

Universidad Carlos III de Madrid
Escuela Politécnica Superior
Departamento de Ingeniería Mecánica



TRABAJO FIN DE GRADO
Grado en Ingeniería Mecánica

**“Modelado de un motor en
Simpack como sistema
multicuerpo y análisis modal de
su cigüeñal”**

Autor:
D. Jorge Sánchez Fernández

Tutora:
Dra. Dña. María Jesús López Boada

Leganés, Junio 2015



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer especialmente a mi madre, mi padre y mi hermana por todo el apoyo que me han dado a lo largo de la carrera, ya que sin ellos nada de esto hubiera sido posible, gracias. También a mi tío, por demostrarme una vez más lo buena persona que es.

A mis grandes amigos de toda la vida, por animarme en los momentos difíciles y estar siempre ahí cuando los he necesitado.

A mis compañeros de universidad, por todos los buenos momentos que me han hecho pasar durante estos cuatro años y en especial a Gerardo por todo su apoyo en este proyecto.

Por último a todos los profesores que me han ayudado y en especial a mi tutora en este proyecto, María Jesús López Boada.

RESUMEN

En el siguiente Trabajo Fin de Grado se analiza el modelado de un sistema multicuerpo. El modelo consiste en un motor de combustión interna alternativo de cuatro cilindros en línea. Para llevar el proceso a cabo se hace uso de un software de simulación con sistemas multicuerpos llamado Simpack. Se detalla el proceso de modelado de cada cuerpo realizando posteriormente el ensamblaje de los mismos.

El módulo *Flexmodal* que implementa Simpack permite hacer análisis modales de un cuerpo flexible. Al ser el cigüeñal uno de los componentes más importantes del motor se realiza sobre él el análisis. Para ello se importa el cuerpo mallado desde el software Ansys Mechanical APDL debido a la falta de licencia del módulo de mallado dentro de Simpack.

Se realizan dos análisis modales uno en Ansys y otro en Simpack con el fin de ver si al hacer la importación de un software a otro hay variación en los resultados del estudio. Finalmente se determina que los valores en ambos análisis son los mismos y que las frecuencias propias obtenidas no están dentro del rango de actuación del cigüeñal dentro del motor.



ABSTRACT

In this project, the modelling of a multibody system will be analysed. The model consists of a 4 cylinder in-line reciprocating internal combustion engine. In order to carry out the process, it is necessary to use a multibody system simulation software called Simpack. The modelling process of each body, as well as their later assembly, will be explained in detail.

The *Flexmodal* unit implemented by Simpack allows making modal analyses of flexible bodies. The analysis will be made about the crankshaft due to it is one of the most important components. In order to do so, the meshed body will be imported from the Ansys Mechanical APDL software because of the mesh part's lack of license within Simpack.

Two modal analyses will be carried out: one with Ansys and the other one with Simpack in the hopes of checking if there is any variation in the results of the study when importing one software to another. To conclude, it can be confirmed that the values in both analyses are the same and that the resultant natural frequencies are not within the same crankshaft's range of action inside the engine.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	I
RESUMEN.....	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE DE CONTENIDO	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos del proyecto.....	2
1.3 Estructura del proyecto	2
CAPÍTULO 2: MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS. COMPONENTES Y FUNCIONAMIENTO	4
2.1 Introducción.....	4
2.2 Procesos de combustión.....	5
2.2.1 Motores de encendido provocado	5
2.2.2 Motores de encendido por compresión.....	6
2.3 Ciclos de trabajo	6
2.3.1 Motores de cuatro tiempos.....	6
2.3.2 Motores de dos tiempos	8
2.4 Componentes de un motor	9
2.4.1 Bloque motor.....	9
2.4.2 Cilindro.....	11
2.4.3 Pistón	12
2.4.4 Bulón.....	14
2.4.5 Biela	15
2.4.6 Cigüeñal	16
2.5 Tipos de geometrías	18
2.5.1 Motores en línea	18



2.5.2 Motores en V	18
2.5.3 Motores en W	19
2.5.4 Motores planos.....	20
2.5.5 Motores radiales.....	20
2.5.6 Motores Wankel	21
CAPÍTULO 3: SISTEMAS MULTICUERPO	22
3.1 Introducción a los sistemas multicuerpo	22
3.2 Elementos de unión.....	23
3.2.1 Elementos de fuerza	23
3.2.1.1 Resortes	24
3.2.1.2 Amortiguadores.....	24
3.2.1.3 Actuadores.....	25
3.2.2 Pares cinemáticos.....	25
3.2.2.1 Pares de revolución	25
3.2.2.2 Pares esféricos.....	26
3.2.2.3 Pares cilíndricos	26
3.2.2.4 Pares helicoidales	27
3.2.2.5 Pares planos.....	28
3.3 Tipos de coordenadas.....	28
3.3.1 Coordenadas globales	29
3.3.2 Coordenadas locales.....	29
3.3.3 Coordenadas relativas	30
CAPÍTULO 4: ESTUDIO DE ANÁLISIS MODAL	31
4.1 Análisis modal	31
4.2 Elementos finitos	33
4.3 Simpack.....	34
4.4 Software para la importación del cuerpo flexible	36
4.4.1 Ansys.....	36
4.4.2 Abaqus	38
4.4.3 Nastran	39
4.5 Antecedentes.....	40
CAPÍTULO 5: DISEÑO DEL MOTOR.....	41



5.1 Diseño del cigüeñal en Solid Edge	41
5.2 Diseño del motor en Simpack.....	44
5.2.1 Cigüeñal	45
5.2.2 Bielas.....	48
5.2.3 Pistones	51
5.2.4 Bloque.....	54
5.2.5 Ensamblaje del motor.....	57
5.2.5.1 Ensamblaje de las bielas	57
5.2.5.2 Ensamblaje de los pistones	59
5.2.5.3 Ensamblaje del bloque motor	61
CAPÍTULO 6: ANÁLISIS MODAL.....	63
6.1 Análisis modal en Ansys.....	63
6.1.1 Introducción	63
6.1.2 Importación de la geometría	63
6.1.3 Mallado.....	66
6.1.3.1 Element Type	66
6.1.3.2 Real Constant.....	68
6.1.3.3 Material Props	69
6.1.3.4 Modeling.....	71
6.1.3.5 Meshing	75
6.1.3.6 Modeling – Contact Pair	76
6.1.4 Análisis modal.....	78
6.2 Análisis modal en Simpack	79
6.2.1 Importación de la malla.....	79
6.2.2 Análisis modal.....	83
6.3 Resultados	84
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS.....	87
7.1 Conclusiones.....	87
7.2 Futuros desarrollos.....	87
BIBLIOGRAFÍA	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Ciclo de trabajo de un motor de cuatro tiempos [3]	7
Figura 2.2 Ciclo de trabajo de un motor de dos tiempos [4]	9
Figura 2.3 Cilindro con camisas seca y húmeda [6]	11
Figura 2.4 Pistón [7]	13
Figura 2.5 Bulón [7]	14
Figura 2.6 Alojamiento del bulón dentro del pistón [7]	14
Figura 2.7 Biela con los pernos de unión del sombrerete [8]	16
Figura 2.8 Cigüeñal [9]	17
Figura 2.9 Motor en línea [10]	18
Figura 2.10 Motor en V [10]	19
Figura 2.11 Motor en W [10]	19
Figura 2.12 Motor Boxer [11]	20
Figura 2.13 Motor radial [12]	21
Figura 2.14 Motor Wankel [13]	21
Figura 3.1 Ejemplo de sistema multicuerpo [14]	22
Figura 3.2 Motor como sistema multicuerpo [14]	23
Figura 3.3 Masas unidas por resortes [16]	24
Figura 3.4 Masas unidas por un amortiguador [17]	25
Figura 3.5 Cuerpos unidos por un actuador [18]	25
Figura 3.6 Par de revolución [19]	26
Figura 3.7 Par esférico [19]	26
Figura 3.8 Par cilíndrico [19]	27
Figura 3.9 Par helicoidal [19]	27
Figura 3.10 Par plano [19]	28
Figura 3.11 Sistema de referencia local junto a sistema de referencia global [14]	29
Figura 4.1 Sistema de un grado de libertad con resorte y amortiguador [20]	31
Figura 4.2 Logotipo de Simpack [21]	34
Figura 4.3 Motor generado en Simpack []	35
Figura 4.4 Logotipo de Ansys [22]	37
Figura 4.5 Logotipo de Abaqus [23]	39
Figura 4.6 Logotipo de Nastran [24]	39
Figura 5.1 Detalle de las medidas del eje y el perfil del brazo (Solid Edge)	42
Figura 5.2 Parte del cigüeñal generado (solid Edge)	43
Figura 5.3 Detalle de la longitud de cada parte y la longitud final (Solid Edge)	43
Figura 5.4 Cigüeñal completo (Solid Edge)	44
Figura 5.5 Geometría del cigüeñal completo (Simpack)	46

Figura 5.6 Cigüeñal con sus marcadores (Simpack)	47
Figura 5.7 Parámetros de la biela obtenidos de Simpack [27]	49
Figura 5.8 Valores para los parámetros de la biela	49
Figura 5.9 Geometría final de la biela (Simpack).....	49
Figura 5.10 Biela con sus marcadores (Simpack)	50
Figura 5.11 Parámetros del pistón de la guía de Simpack [27]	52
Figura 5.12 Valores de los parámetros del pistón	52
Figura 5.13 Bulón dentro del pistón (Simpack)	53
Figura 5.14 Marcador del bulón (Simpack)	53
Figura 5.15 Parámetros de la guía de Simpack para el bloque motor [27]	55
Figura 5.16 Valores para los parámetros del bloque	55
Figura 5.17 Geometría final del bloque motor (Simpack)	56
Figura 5.18 Bloque motor con el marcador creado (Simpack).....	56
Figura 5.19 Creación de la subestructura de la primera biela (Simpack).....	57
Figura 5.20 Opciones de la unión junto con la propia unión realizada (Simpack)	58
Figura 5.21 Unión de todas las bielas al cigüeñal (Simpack)	59
Figura 5.22 Unión de los pistones a las bielas (Simpack)	59
Figura 5.23 Cilindros y marcadores fijos (Simpack).....	61
Figura 5.24 Ensamblaje final del motor (Simpack).....	62
Figura 6.1 Comandos para el cambio de unidades [28]	64
Figura 6.2 Archivo ".iges" sin modificar.....	64
Figura 6.3 Archivo ".iges" modificado	65
Figura 6.4 Cigüeñal importado (Ansys)	65
Figura 6.5 Lista de etapas (Ansys)	66
Figura 6.6 Lista de elementos añadidos (Ansys)	67
Figura 6.7 Constante real y factor de reducción del elemento SOLID185 (Ansys)	68
Figura 6.8 Valores asignados a la constante real del elemento MASS21 (Ansys)	69
Figura 6.9 Definición de las propiedades del material I (Ansys)	70
Figura 6.10 Definición de las propiedades del material II (Ansys)	70
Figura 6.11 Cigüeñal con los keypoint creados (Ansys)	72
Figura 6.12 Keypoint del WorkPlane (Ansys)	73
Figura 6.13 Ejes del WorkPlane (Ansys)	73
Figura 6.14 Ejes girados del WorkPlane (Ansys).....	74
Figura 6.15 Realización de la segunda división del volumen (Ansys).....	74
Figura 6.16 Mallado de los extremos del eje (Ansys).....	75
Figura 6.17 Mallado de todo el volumen (Ansys).....	76
Figura 6.18 Selección en Ansys de estudio de análisis modal (Ansys)	78
Figura 6.19 Lista de las 20 primeras frecuencias propias (Ansys)	79
Figura 6.20 Archivos necesarios para la importación de la malla	80
Figura 6.21 Código del archivo "soapbox_ansys_input.dat"	81

Figura 6.22 Código del mallado	82
Figura 6.23 Opciones y lista de los modos de vibración	83
Figura 6.24 Séptimo modo de vibración (Ansys).....	85
Figura 6.25 Séptimo modo de vibración (Simpack).....	85
Figura 6.27 Noveno modo de vibración (Ansys).....	86
Figura 6.26 Noveno modo de vibración (Simpack)	86
Figura 6.29 Decimocuarto modo de vibración (Simapck)	86
Figura 6.28 Decimocuarto modo de vibración (Ansys)	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1 Medidas de los diámetros de las diferentes partes	41
Tabla 5.2 Medidas de las longitudes de las partes	41
Tabla 5.3 Coordenadas y giros de los cuerpos que componen el cigüeñal.....	46
Tabla 5.4 Coordenadas de los marcadores del cigüeñal	47
Tabla 5.5 Coordenadas de los marcadores de las bielas	50
Tabla 5.6 Coordenadas del bulón	52
Tabla 5.7 Coordenadas del marcador del bulón	53
Tabla 5.8 Dimensiones mínimas del bloque.....	54
Tabla 5.9 Coordenadas del marcador del bloque	56
Tabla 5.10 Coordenadas de los marcadores fijos.....	60
Tabla 5.11 Dimensiones de los cilindros	60
Tabla 5.12 Coordenadas de los cilindros	60
Tabla 6.1 Propiedades de los elementos.....	67
Tabla 6.2 Propiedades del acero	71
Tabla 6.3 Datos de los keypoint	72
Tabla 6.4 Número de nodo asociado a cada keypoint	77
Tabla 6.5 Coordenadas y números de los nodos de cada contacto	77
Tabla 6.6 Comparación de los valores obtenidos.....	84

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La manera de realizar estudios en el mundo de la ingeniería ha experimentado un gran cambio desde la llegada de los software de análisis por elementos finitos. Antes de su llegada la única manera de poder realizar estudios era resolviendo las ecuaciones de manera analítica, lo que en la mayoría de los casos se traducía en un proceso largo y tedioso. Con la llegada de la primera computadora en los años 50 llegaron los primeros cálculos computacionales. Posteriormente en los años 60 y 70 las aplicaciones prácticas de elementos finitos fueron desarrollándose y creciendo a la par que lo hacían los ordenadores, ganando memoria y potencia de cálculo. Fue a partir de los años 80 cuando se potencio su uso con la llegada a más usuarios de ordenadores personales y con ello la creación de programas comerciales para uso particular. A día de hoy existen una gran cantidad de programas que implementan los análisis por elementos finitos, y que facilitan el trabajo enormemente a los ingenieros.

Gracias a estos programas se pueden hacer una gran cantidad de estudios diferentes que permiten conocer el comportamiento que tendrán los elementos de estudio al estar sometidos a diferentes situaciones. Uno de los estudios que se puede llevar a cabo es el análisis modal de un elemento. En este análisis se obtienen las frecuencias propias de vibración o también llamadas modos de vibración del elemento que se estudia. Estas frecuencias se caracterizan por ser aquellas en las que el cuerpo que las experimenta alcanza su grado máximo de oscilación. Para llevar a cabo el análisis lo único que se necesita es diseñar el elemento y generar un mallado del mismo. Esto podrá hacerse mediante el uso de los software de simulaciones existentes actualmente.

Dos de los software de simulación que ofrecen una gran potencia y capacidad de trabajo son Ansys y Simpack. Con ellos será posible realizar tanto un análisis modal como cualquier otro tipo de análisis generales. Además cada uno tiene diferentes especialidades que hacen de ellos dos de los grandes programas de simulación que se conocen. Con ellos se podrá realizar el estudio de uno de los componentes más importantes de un motor de combustión interna alternativo. El cigüeñal siempre ha sido objeto de análisis debido a que es un elemento principal en el buen funcionamiento de un motor.

1.2 Objetivos del proyecto

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es el modelado de un motor de combustión interna alternativo de cuatro cilindros en línea como un sistema multicuerpo. Posteriormente se realizan dos análisis modales de uno de los componentes principales del motor, el cigüeñal, y se obtienen las 20 primeras frecuencias propias usando dos programas que implementan el cálculo por elementos finitos.

Para generar el motor se usa el software especializado en trabajar con sistemas multicuerpo llamado Simpack. Con este programa se detalla la creación de cada uno de los cuerpos y se analiza el ensamblaje de los mismos. También es usado para hacer uno de los análisis modales.

Para generar el cuerpo flexible se hace uso de Ansys Mechanical ADPL debido a la falta del módulo para obtener estos cuerpos dentro de Simpack. Se detalla la generación de la malla del cigüeñal debido a que debe cumplir condiciones de compatibilidad con Simpack. En Ansys se hace el segundo de los análisis modales con el fin de determinar si se producen cambios en los valores de las frecuencias propias al realizar una importación de un cuerpo flexible de un programa a otro y se muestran algunos de los modos de vibración obtenidos en los análisis.

1.3 Estructura del proyecto

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN. Se introduce el tema que se trabaja en este proyecto, así como los objetivos que se pretenden alcanzar y la manera en la cual esta estructurado.

CAPÍTULO 2: MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS. COMPONENTES Y FUNCIONAMIENTO. Se expone de manera teórica el funcionamiento de los motores de combustión interna alternativos, los procesos de combustión que presentan y los ciclos de trabajo que pueden tener. También se presentan los componentes principales que lo integran, y se examinan las diferentes geometrías que pueden adoptar.

CAPÍTULO 3: SISTEMAS MULTICUERPO. Se introducen los sistemas multicuerpo y se comentan los elementos de unión existentes y los tipos de coordenadas que se puede tener en estos sistemas.

CAPÍTULO 4: ESTUDIO DE ANÁLISIS MODALES. Se explica en que consiste un análisis modal y se hace una introducción al cálculo por elementos finitos. Se

presentan los software que se usan y unos estudios antecedentes realizados por otros autores.

CAPÍTULO 5: DISEÑO DEL MOTOR. Se muestran los procedimientos que se han seguido para crear los componentes del motor. Por un lado se ve como se ha construido el cigüeñal dentro del programa de diseño Solid Edge. Y por otro lado se muestran los pasos seguidos para obtener los cuerpos que forman el motor dentro de Simpack y el posterior ensamblaje de los mismos.

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS MODAL. Se realizan los estudios de análisis modal. En primer lugar se detalla el proceso de generación de la malla y el análisis realizado en Ansys y posteriormente la importación del cuerpo flexible y el análisis que se realiza en Simpack.

CAPÍTULO 7: RESULTADOS. En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos en ambos análisis y se realizará una comparación entre ellos con el fin de ver si hay diferencias en los resultados por haber hecho una importación del mallado de la geometría desde un programa al otro.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS. En este último capítulo del proyecto, se realizan las conclusiones a las que se han llegado y se exponen los futuros desarrollos que se pueden hacer con cuerpos flexibles.

CAPÍTULO 2: MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS. COMPONENTES Y FUNCIONAMIENTO

2.1 Introducción

A pesar de los primeros intentos, como el de Herón de Alejandría en el siglo I antes de Cristo que desarrollo la primera máquina térmica, se podría decir que los motores nacieron con el desarrollo de las máquinas de vapor, ya que fueron estas máquinas las que sentaron las bases para la aparición posterior de los motores de combustión interna [1].

El primer motor de combustión interna fue el desarrollado por el belga Étienne Lenoir. Este ingeniero patentó un motor de combustión interna alternativo (MCIA) en 1860, aunque este motor tenía un rendimiento muy bajo debido a que no había compresión previa de la mezcla. Puede decirse que la verdadera fecha que marca el nacimiento del MCIA actual fue el año 1876, ya que fue en este año cuando el alemán Nicolaus Otto solicitó la patente Gasmotor, obtenida a nombre de la Gasmotorenfabrik Deutz AG. A lo largo de los siguientes años, fueron desarrollándose los MCIA que actualmente son los más conocidos, estos son el motor de encendido por compresión o motor diesel, y el motor de encendido provocado o motor de gasolina.

Un motor de combustión interna es aquel en el que la combustión del fluido de trabajo se realiza dentro de una cámara de combustión que está integrada dentro del ciclo. Al producirse la combustión, los gases generados que tienen una elevada temperatura y una alta presión se expanden generando la fuerza deseada. Esta fuerza moverá los pistones que, a su vez a través de las bielas, llevará el movimiento hacia el cigüeñal, cuyo eje aportará el movimiento allí donde sea necesario. Es así como se obtiene energía mecánica a partir de la energía química almacenada en el combustible [2]. Dependiendo de donde se produzca la combustión, los motores pueden ser clasificados en:

- Motores de combustión externa: cuando el proceso de combustión se lleva a cabo de forma externa al fluido de trabajo, como por ejemplo en motores Stirling o turbinas de vapor.
- Motores de combustión interna: cuando el proceso de combustión se lleva a cabo en el propio fluido de trabajo, siendo este normalmente una mezcla de aire y combustible.

A su vez, los de combustión interna pueden ser también clasificados según la forma que tiene de producirse la combustión, esto es:

- Motores de combustión continua: donde el proceso de combustión ocurre de manera continua en el tiempo y por ello el fluido de trabajo pasará también de forma continua por el motor. Un ejemplo de este tipo de motores son las turbinas de gas.
- Motores de combustión discontinua: en este caso el proceso de combustión ocurre de forma intermitente, donde el fluido realizará un trabajo sobre una superficie móvil o aumentando la energía cinética de una corriente. Algunos ejemplos son los motores alternativos (MEC, MEP), los rotativos (Wankel) o los propulsivos (pulsorreactor).

Debido a las ventajas que presentan estos motores frente a otros tipos, los motores de combustión interna alternativos han dominado en un amplio campo de aplicaciones. El rendimiento, considerando las limitaciones termodinámicas, la variación en función del tipo del motor y las condiciones de operación, son bastante buenos. La potencia que pueden entregar varía desde decenas de Watios hasta varias decenas de Megavatios, lo que hace que su campo de operación sea bastante amplio. En cuanto a los combustibles, pueden usarse de distinta naturaleza y en fase gaseosa, líquida o sólida. Esta última siempre y cuando se realice una pulverización fina. También pueden adaptarse a distintos tipos de combustibles, lo que les confiere un gran potencial para usar combustibles alternativos [2].

2.2 Procesos de combustión

Atendiendo al proceso de combustión que se lleva a cabo dentro de los cilindros, se pueden tener motores de encendido provocado (MEP) y motores de encendido por compresión (MEC).

2.2.1 Motores de encendido provocado

La principal característica de los Motores por Encendido Provocado (MEP) es que el inicio de la combustión se realiza mediante un aporte externo de energía al ciclo, que suele ser producido haciendo saltar una chispa entre los electrodos de una bujía.

La mezcla de aire y combustible puede ser de diferentes formas. Puede realizarse la mezcla fuera del cilindro durante el proceso de admisión (motores de mezcla homogénea) o bien, puede introducirse únicamente aire en el proceso de admisión, y posteriormente en el cilindro inyectarse el combustible durante el proceso de compresión produciendo una mezcla heterogénea (motores de inyección directa y mezcla estratificada).

La combustión avanza por el cilindro mediante la producción de un frente de llama que se origina en la bujía y que recorre la cámara de combustión separando claramente dos zonas, una con gases frescos y otra con los gases quemados [2].

2.2.2 Motores de encendido por compresión

En los Motores de Encendido por Compresión (MEC) la combustión se realiza mediante un proceso de autoencendido de la mezcla al alcanzarse unas temperaturas lo suficientemente elevadas dentro del cilindro debido a la compresión. Debido a que no hay un momento exacto en el que se produce la combustión, para poder controlarlo se introduce solamente aire durante el proceso de admisión y el combustible se inyecta hacia el final de la carrera de compresión, momento en el que el aire alcanza unas altas temperaturas que ayudan al autoencendido.

En los MEC la mezcla de aire y combustible es heterogénea y la combustión se lleva a cabo en aquellas zonas donde se dan las condiciones adecuadas, con preferencia donde el dosado es cercano al estequiométrico. Se tienen diferentes frentes de llama y no uno solo como en los MEP [2].

2.3 Ciclos de trabajo

En cuanto a los ciclos de trabajo que se pueden tener, los motores alternativos pueden clasificarse en motores de cuatro tiempos (4T) y motores de dos tiempos (2T).

2.3.1 Motores de cuatro tiempos

El ciclo de 4 tiempos (4T) se realiza mediante dos vueltas completas del cigüeñal. Se realizan cuatro carreras del pistón, de ahí su nombre de cuatro tiempos. El ciclo que se tiene en estos motores se compone de cuatro etapas: admisión,

compresión, expansión y escape, como se puede observar en la Figura 2.1 junto con la referencia a distintos elementos que serán detallados posteriormente. Las etapas del ciclo son las siguientes:

- Etapa de admisión: las válvulas de admisión están abiertas y las de escape están cerradas, y el pistón se desplaza desde el punto muerto superior (PMS), hasta el punto muerto inferior (PMI). Dentro del cilindro se introduce aire mezclado con combustible o simplemente aire, dependiendo del motor. Cuando se haya realizado la carrera completa, es decir, se haya llegado al PMI, las válvulas de admisión se cerrarán.
- Etapa de compresión: tanto las válvulas de admisión como las de escape están cerradas en esta etapa. El pistón pasará del PMI al PMS haciendo que se comprima el fluido de trabajo. Momentos antes de llegar al PMS saltará la chispa de la bujía si se trata de un motor de encendido provocado o en el caso de ser de encendido por compresión, se inyectará el combustible, realizándose la combustión.
- Etapa de expansión: al haberse realizado la combustión, se tienen unas altas presiones dentro del cilindro y los gases se expanden, haciendo que el pistón se desplace hasta el PMI. En esta etapa es donde se obtiene trabajo.
- Etapa de escape: una vez se está en el PMI, las válvulas de escape se abren y el pistón asciende hasta el PMS haciendo que los gases quemados salgan del cilindro. Una vez el pistón ha llegado al PMS, las válvulas de escape se cierran y empieza un nuevo ciclo.

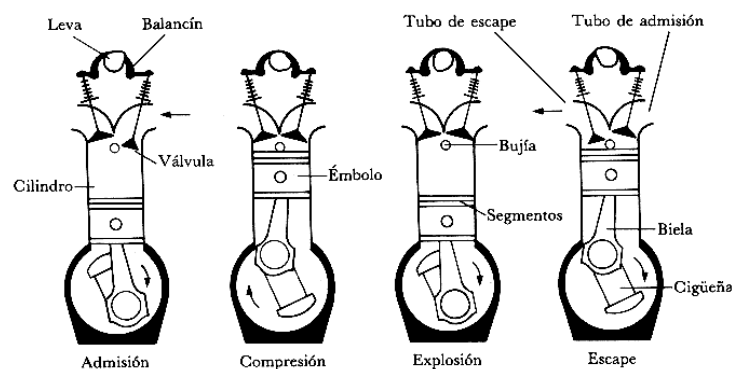


Figura 2.1 Ciclo de trabajo de un motor de cuatro tiempos [3]

En la práctica, a lo descrito anteriormente hay que realizarle algunas modificaciones debido a la compresibilidad del aire y a que la combustión no puede realizarse a volumen constante. Los instantes de apertura y cierre de las válvulas de admisión y escape no coinciden exactamente con los puntos de PMS y PMI. Es por ello que se producirán adelantos y retrasos en las aperturas y cierres de las válvulas, produciéndose en ocasiones cruces de válvulas, instantes en los cuales tanto la válvula de admisión como la de escape están abiertas [2].

2.3.2 Motores de dos tiempos

En los motores de 2 tiempos (2T) el ciclo se realiza en una única vuelta del cigüeñal, lo que supone dos carreras del pistón. Se llevan a cabo las mismas etapas que en un motor de cuatro tiempos, pero la gran diferencia es que en el proceso de renovación de la carga son los gases frescos los que expulsan a los gases quemados y no el pistón. Este proceso se denomina barrido y ocurre debido a que los gases frescos están a una presión mayor que los gases del interior del cilindro, por lo que barre a estos hacia el escape.

Empezando desde el instante en el que se va a realizar la expansión, el ciclo se desarrolla como sigue a continuación. El pistón baja desde el PMS, y los gases frescos están ubicados dentro del cárter. Sobre a la mitad de la carrera de expansión se inicia el proceso de escape. Esto puede ser mediante la apertura de una o más válvulas de escape o por aberturas practicadas en el propio cilindro, llamadas lumbreras y que quedan abiertas debido al movimiento del pistón. De una manera u otra, los gases de escape comienzan a salir de manera espontánea por la elevada presión del interior. Antes de que se llegue al PMI se inicia la admisión por uno de los métodos descritos anteriormente. La presión en el interior habrá descendido por lo que los gases frescos entrarán al cilindro realizando el barrido del resto de gases de escape que quedaban en el interior. Una vez el pistón comienza a subir tanto la admisión como el escape continúan abiertos y el barrido continúa. Cuando la carrera hacia el PMS ha avanzado se cierran las válvulas o lumbreras de admisión y escape llegando al punto de compresión y posterior combustión comenzando un nuevo ciclo. Este proceso se puede ver en la Figura 2.2.

En este ciclo el pistón no realiza ningún trabajo para expulsar los gases quemados; esto es debido a que se necesita que la presión en el conducto de admisión sea mayor que la presión en el escape [2].

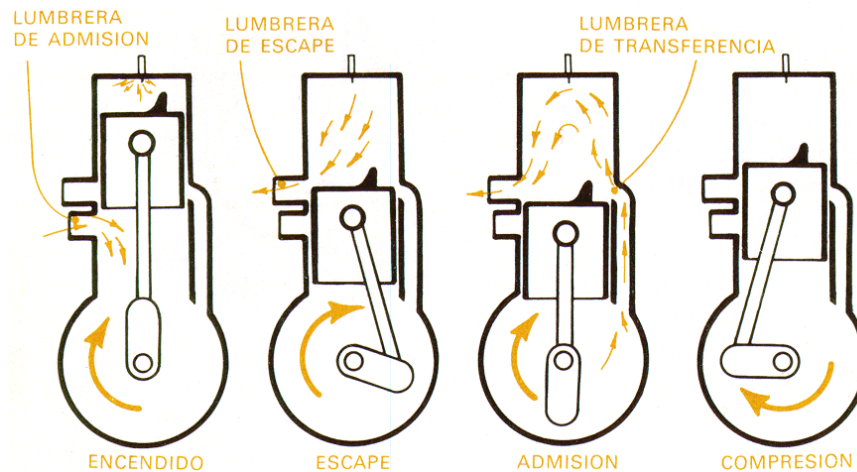


Figura 2.2 Ciclo de trabajo de un motor de dos tiempos [4]

2.4 Componentes de un motor

2.4.1 Bloque motor

El bloque motor constituye el principal armazón del motor y es donde van instalados el resto de los componentes. La forma de este elemento determina la forma final que tiene el motor. Tiene diferentes misiones, siendo la de mayor importancia la de soportar y proteger todos los componentes móviles; también se encarga de colaborar al equilibrio térmico y sujeta el motor a la estructura de soporte.

Pueden diferenciarse tres partes que bien pueden estar integradas en una sola pieza o bien ser independientes. Cada una de estas partes presenta requerimientos específicos y esto tiene particular influencia en el diseño de todo el conjunto. Las tres partes mencionadas son las siguientes:

- Bloque: es la parte estructural principal, y donde están alojados los cilindros.
- Cilindros: pueden estar integrados en el bloque o ser elementos desmontables.
- Bancada: zona en la cual se aloja el cigüeñal y que en motores de gran cilindrada es una parte independiente del bloque.

Hay diferencias en la arquitectura del bloque motor dependiendo de si este está refrigerado por aire o por agua. En los que están refrigerados por aire los cilindros están acoplados de manera independiente en la bancada, por lo que no se tiene un bloque como tal. Para los refrigerados por agua los cilindros se integran como parte del bloque. Este último tipo de refrigeración es el más extendido y el que aplican la mayoría de los motores de combustión interna alternativos.

Debido a la importancia que tiene, el bloque motor debe cumplir algunos requisitos para que pueda ser funcional. Algunos de los más importantes son:

- Rigidez elevada.
- Resistencia mecánica.
- Resistencia a fatiga.
- Conductividad térmica adecuada.
- Tenacidad.
- Dimensiones reducidas.
- Facilidad en el acceso, montaje y revisión de los elementos que lo componen.

La geometría de este componente es variada y será detallada en el siguiente apartado. Al ser el componente más costoso, en la mayoría de los motores se suele interponer piezas recambiables (guías, camisas de cilindro, cojinetes, etc.) en las zonas donde se pueden tener problemas de desgaste o deterioro [5].

Los materiales más usados comúnmente son:

- Hierro fundido: es usado muy frecuentemente en motores de automoción. Este material tiene buena aptitud para desarrollar formas complicadas, una elevada rigidez y una alta resistencia a la fatiga, siendo además una de las soluciones más baratas. El mayor inconveniente de este material es el peso.
- Aleación ligera: responde a una necesidad de disminuir el peso, es por ello que su uso está orientado a la automoción de competición y a la aviación. Tiene problemas de resistencia mecánica y su rigidez es inferior a la del hierro fundido. También el coste es más elevado.
- Chapa soldada: su uso está reducido a los motores de grandes dimensiones, siendo su uso más habitual los motores marinos.

2.4.2 Cilindro

El cilindro de un motor puede estar integrado en el bloque motor o bien formar una pieza recambiable, que es la camisa del cilindro. La función principal de este elemento es la de guiar al pistón en su movimiento vertical. Es en el interior del cilindro donde se produce el ciclo termodinámico. También se encarga de transferir el calor generado por el ciclo, hasta el líquido de refrigeración.

Como se ha mencionado los cilindros pueden estar integrados en el bloque en cuyo caso no llevan camisa; o bien pueden ser una parte independiente al bloque, en cuyo caso sí que tendrán camisa.

En los cilindros sin camisa el propio cilindro está integrado en el bloque y entra en contacto con el resto de mecanismos (pistón y biela). Suele usarse en motores pequeños y de automoción. La mayor ventaja que presenta es el coste de fabricación, pero tiene varios inconvenientes a tener en cuenta. Uno de ellos es que se necesita el uso de materiales con buenas características antifricción para todo el conjunto del bloque, aunque solo los cilindros hagan uso de esta característica. En el caso de que no se usara un material con baja fricción sería necesario realizar un tratamiento de acabado superficial en los cilindros. Otro inconveniente es que en caso de avería tendría que llevarse a cabo un mecanizado a medida en el cilindro.

En cuanto a los cilindros con camisa, estos están equipados con una camisa postiza que se introduce dentro del bloque y es esta parte la que entra en contacto con el pistón. Este formato tiene el inconveniente de ser más caro, pero te permite la posibilidad de emplear materiales especiales y es fácilmente intercambiable en caso de avería o desgaste. Dentro de los cilindros con camisa se puede hacer una división entre los que tienen camisa seca y camisa húmeda. Los de camisa seca son aquellos en los que el fluido de refrigeración y la camisa no entran en contacto [5]. Mientras que en los de camisa húmeda sí que entra en contacto la camisa con el fluido. Cada uno de estos tipos tiene una geometría diferente como se puede ver en la Figura 2.3.

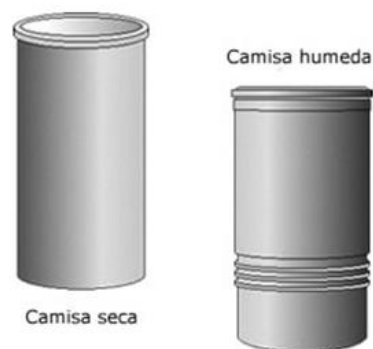


Figura 2.3 Cilindro con camisas seca y húmeda [6]

Los requisitos más importantes que debe cumplir el cilindro para tener un correcto funcionamiento son:

- Resistencia al desgaste.
- Elevada rigidez.
- Compatibilidad con el pistón.
- Bajo coeficiente de fricción entre el pistón y el cilindro.
- Buena conductividad térmica.
- Coeficiente de dilatación adecuado.

Tanto la geometría como el número de cilindros pueden variar en función del tipo de motor, pudiendo tener desde un solo cilindro en motores de motosierras o pequeñas motocicletas, donde la refrigeración se realiza normalmente mediante aletas, hasta los 12 o 16 cilindros en motores de automóviles, barcos o aviones. También se pueden encontrar cilindros constituidos por camisas de cilindros, donde se tiene únicamente un tubo cilíndrico incorporado al bloque motor y que posibilita tener el líquido de refrigeración en contacto directo con el cilindro. Esto facilita la construcción del bloque motor, pero hay que tener cuidado de garantizar la estanqueidad.

El material más empleado para los cilindros es la fundición en gris. Se le pueden añadir algunos tratamientos para elevar sus prestaciones, como por ejemplo un cromado en el interior de los cilindros para mejorar el coeficiente de rozamiento con el acero y hacerlo más resistente a la corrosión.

2.4.3 Pistón

El pistón se ubica dentro del cilindro y forma la frontera móvil del volumen variable en el que se va a desarrollar el ciclo termodinámico. Es por ello que este elemento debe ser capaz de soportar las elevadas presiones de los gases que se generan en el ciclo. En los motores de dos tiempos participan en el proceso de llenado y vaciado en el cilindro y en los motores diesel colaboran con su forma a un adecuado proceso de combustión [5].

Este componente está sometido a unas condiciones de trabajo duras. Tiene que soportar unas presiones y temperaturas con un rango de variación muy elevado y amplio. Además la lubricación es muy problemática, tanto en la zona de contacto con el cilindro, como en la zona de contacto con el bulón. Esto hace que el pistón sea el elemento que contribuye de manera principal a las pérdidas mecánicas del motor. Es por esto que debe cumplir diversos requisitos funcionales. Los más importantes son:

- Forma y dimensiones adecuadas (estrechas tolerancias para asegurar la estanqueidad).
- Resistencia mecánica.
- Rigidez.
- Resistencia a la fatiga y al desgaste.
- Bajo coeficiente de dilatación.

El pistón, que se puede ver en la Figura 2.4, tiene partes diferenciadas que son:

- Cabeza: esta es la zona en contacto directo con los gases del ciclo. Puede tener distintas formas dependiendo del motor, para favorecer de una manera u otra el ciclo.
- Zona de estanqueidad: formada por una serie de ranuras situadas por encima del bulón. Su función es la de minimizar la fuga de gases del cilindro, impidiendo a la vez la entrada de aceite en la cámara de combustión.
- Zona directriz: también llamada comúnmente falda, cuya misión es apoyarse en la pared interior del cilindro y así guiar el movimiento vertical del pistón.

Para la realización de los pistones se pueden usar diferentes materiales. Algunos de los más usados son:

- Fundición: frecuente en motores industriales pequeños. Tiene buena resistencia mecánica y su mayor inconveniente es el peso.
- Acero: usado en la industria aeronáutica, con alta resistencia mecánica, es más ligero que la fundición.
- Aleaciones ligeras: tienen buenas propiedades mecánicas y elevados coeficientes de conductividad.



Figura 2.4 Pistón [7]

2.4.4 Bulón

El bulón (Figura 2.5) sirve fundamentalmente para realizar la unión entre la biela y el pistón y permitir el movimiento relativo entre ambos elementos, como se aprecia en la Figura 2.6. Este movimiento relativo es la etapa en la que se transforma el movimiento alternativo que tiene el pistón respecto del cilindro en el movimiento rotativo que tiene la biela.

Este eje debe tener un excelente acabado superficial, ya que las holguras con el pie de biela y con los alojamientos del bulón dentro del pistón deben estar dentro de unos márgenes muy estrechos. En el caso de que fueran ligeramente altos, se podrían generar ruidos y un aumento muy elevado del desgaste; y en el caso de ser demasiado bajos podrían producirse agarrotamientos. Debido a esto y a otros requisitos funcionales, el bulón debe cumplir entre otros requisitos:

- Alta rigidez.
- Resistencia mecánica.
- Resistencia a fatiga.
- Excelente acabado superficial.
- Compatibilidad con la biela y el pistón.
- Poca masa.

La masa de este elemento debe disminuir lo máximo posible sin alterar las propiedades mecánicas del componente. Es por ello que se realiza un taladro interior.

Hay distintas maneras de colocar los bulones en los pistones:

- Fijo en el pistón y flotante en el pie de biela.
- Fijo en el pie de biela y flotante en el pistón.
- Flotante tanto en el pistón como en el pie de biela.

Los materiales más usados en la industria son los aceros de gran resistencia. En el caso de motores de competición de altas prestaciones, se podrían realizar con aceros de calidades superiores [5].



Figura 2.5 Bulón [7]



Figura 2.6 Alojamiento del bulón dentro del pistón [7]

2.4.5 Biela

La biela es el principal elemento que hay a la hora de convertir el movimiento alternativo del pistón en el movimiento rotativo que tiene el cigüeñal. Este elemento está sometido a un sistema de fuerzas complejo y variable en el tiempo. Esto es debido a la variabilidad del régimen de giro del motor en cada instante. Por ello, los requisitos funcionales más importantes que debe tener son:

- Rigidez elevada.
- Resistencia mecánica.
- Resistencia a fatiga.
- Tenacidad.

La biela se compone de tres partes diferenciadas:

- Pie: parte superior que une la biela con el bulón.
- Cabeza: parte inferior que une la biela con el cigüeñal.
- Cuerpo: parte de la biela que une las dos partes anteriores.

La cabeza normalmente tiene una parte que se puede desmontar llamado sombrerete y que posibilita de manera fácil la unión con el cigüeñal. Este sombrerete está unido a la biela mediante unos pernos que pueden verse en la Figura 2.7. También cuenta con unos pequeños cojinetes tanto en el pie como en la cabeza, que sirven para minimizar los problemas de desgaste que pueden existir debido al contacto de la biela con el bulón y el cigüeñal.

En cuanto a la parte del cuerpo, cuanto mayor longitud tenga menor será la fuerza lateral que el pistón ejercerá sobre las paredes del cilindro, pero se tendrá un mayor riesgo de que se produzca pandeo. Es por ello que la longitud normal del cuerpo oscila entre 1.5 y 2 veces la carrera del pistón. La sección que tiene el cuerpo es en forma de H o doble T, uniéndose al pie y a la cabeza mediante radios de acuerdo que no serán muy pequeños para que no se conviertan en concentradores de tensiones [2].

El pie de biela es recomendable mantenerlo lubricado, es por lo que puede haber un conducto que comunica la cabeza con el pie para realizar dicha lubricación.

Los materiales usados a la hora de fabricar bielas son:

- Aceros especiales: empleados sobretudo en motores rápidos para dar más ligereza al conjunto.
- Aleaciones de titanio y aluminio: al tener un coste elevado son usados en motores de competición y motores de aviación.

- Fundición de grafito esferoidal: muy empleada por sus buenas prestaciones mecánicas y su bajo coste.



Figura 2.7 Biela con los pernos de unión del sombrerete [8]

2.4.6 Cigüeñal

El cigüeñal es la última pieza en generar movimiento rotativo a partir del movimiento alternativo. Su eje entregará la energía producida en el ciclo de manera directa, como por ejemplo las hélices de avión, o bien a través de otros elementos como embragues o cajas de cambio. También mueve otros elementos importantes para el motor como pueden ser la distribución, la refrigeración, la lubricación o los generadores de corriente entre otros.

Al principio los motores que se usaban eran monocilíndricos, por lo que la idea de cigüeñal no estaba muy desarrollada ya que solo se tenía un cilindro. Cuando se vio la necesidad de obtener mayor potencia de los motores y se llegó a la conclusión de que la mejor solución era tener más cilindros, la opción del cigüeñal cobró vida y se fue desarrollando hasta obtener las geometrías de cigüeñal que se conocen actualmente.

Este elemento está sometido a una distribución de fuerzas variables que cambiará conforme el régimen de giro del motor sea mayor o menor. Debe estar bien lubricado para que esté protegido de esta variabilidad. Una de las maneras de asegurarse una buena lubricación es mediante unos conductos internos a través del cigüeñal.

Uno de los requisitos esenciales del cigüeñal es el equilibrado, tanto estático como dinámico. El estático se consigue distribuyendo todo el peso de manera

uniforme en torno al eje. Y el dinámico se necesita para eliminar cualquier vibración generada por el movimiento que les transmite las bielas. Estos equilibrios se consiguen adoptando una geometría con contrapesos en la zona opuesta de la unión con las bielas, de esta manera cuando se produce el movimiento rotatorio, las fuerzas centrífugas están uniformemente repartidas.

El proceso de producción de la fuerza motriz en cada uno de los cilindros se genera solo en una carrera. Es por esto que hay que realizar de manera adecuada la geometría para que no se tengan vibraciones ni desequilibrios tanto en el conjunto del motor como en el elemento receptor de la energía [5].

Otros de los requisitos funcionales más importantes que deben tener los cigüeñales son:

- Rigidez elevada (tanto a flexión como a torsión).
- Alta resistencia mecánica.
- Alta resistencia a fatiga.
- Tener las frecuencias propias alejadas de los regímenes de uso del motor.

La morfología del cigüeñal depende principalmente del número de cilindros que se tengan en nuestro motor. Normalmente, el cigüeñal estará compuesto por una única pieza, como puede verse en la Figura 2.8, aunque en motores en forma de estrella (para uso en aviación), suele ser desmontable.

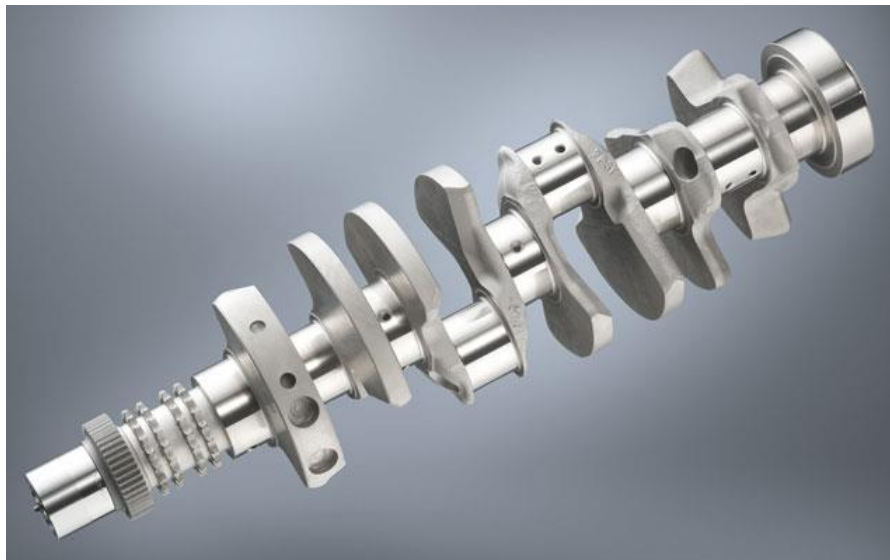


Figura 2.8 Cigüeñal [9]

2.5 Tipos de geometrías

No hay un único tipo de geometría en los actuales motores de combustión interna alternativos. Para cada situación se requieren unas dimensiones y geometrías específicas. Así, por ejemplo, no se necesitará el mismo tipo en un aeroplano que en un pequeño automóvil utilitario. Por tanto, se podrá encontrar diferentes tipos de geometrías.

2.5.1 Motores en línea

Los motores en línea (Figura 2.9), se caracterizan por ser los más comunes y los que tienen una fabricación más sencilla. Son los más usados en la industria automovilística, ya que tienen una estructura compacta, y pueden ser instalados tanto de manera longitudinal como transversal al vehículo. En automóviles suelen estar fabricados con un máximo de 6 cilindros, ya que si se instalarán más el motor tendría una longitud demasiado larga. Los más comunes son los de 4 cilindros. También son empleados para motores de barcos o trenes, aunque con unas dimensiones mayores.



Figura 2.9 Motor en línea [10]

2.5.2 Motores en V

Los motores en V (Figura 2.10), pueden considerarse como dos motores en línea que tienen un ángulo entre sus bancos de cilindros llamado ángulo de bancada. Este ángulo oscila entre unos valores aproximados de 55° y 110° . Resulta una solución frente a los motores en línea a la hora de querer ubicar motores de más de 6 cilindros. Su uso varía desde los motores de 2 hasta los de 24 cilindros. Los más usados en automóviles varían entre los 6 y los 12 cilindros.

El tener un mayor número de cilindros conlleva que se tengan también más bielas que acoplar al cigüeñal. En este caso, para no tener un cigüeñal de las mismas longitudes que un motor en línea, lo que se hace es colocar dos bielas en cada muñón de manivela. De esta forma, se reduce en longitud, que es una de las ventajas de los motores en V frente a los motores en línea.

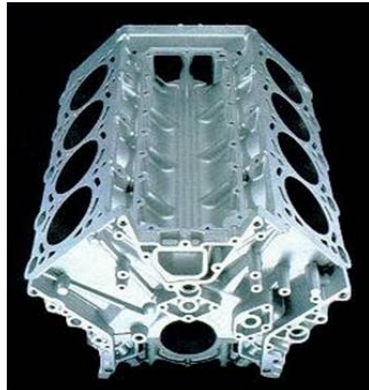


Figura 2.10 Motor en V [10]

En este apartado, se pueden incluir los motores en VR. Estos también son en V, pero se caracterizan por tener un ángulo de bancada muy pequeño, que oscila entre 10° y 15° . A diferencia de los motores en V, aquí solo se tiene una culata donde están dispuestos todos los cilindros.

2.5.3 Motores en W

Al igual que en los motores en V, los motores en W (Figura 2.11), reciben este nombre por la geometría semejante que tienen a la letra W. Tienen tres tipos de configuración: una con dos bancos de cilindros y dos cigüeñales, una con tres bancos y otra con cuatro bancos.



Figura 2.11 Motor en W [10]

2.5.4 Motores planos

En los motores planos, los cilindros están dispuestos de manera opuesta sobre un mismo plano. Podría decirse que son motores en V pero con un ángulo de bancada de 180° . Aunque en este apartado se pueden diferenciar dos geometrías diferentes que son muy similares no iguales. En motores planos se encuentran los motores Bóxer y los motores en V a 180° . La diferencia entre ambos radica en la forma de conectar la biela al cigüeñal. En los Bóxer (Figura 2.12), se dispone una biela por muñón, por lo que cada pareja de pistones colocados opuestos, llegarán en el mismo momento tanto al punto muerto inferior como al superior. En el caso de los V a 180° , en los cilindros opuestos, sus bielas están conectadas al mismo muñón del cigüeñal. Esto hace que los pistones opuestos realicen un movimiento alternativo, es decir, cuando un pistón se encuentra en el punto muerto superior, el otro pistón está en el inferior.

Por otra parte, estos motores son más cortos que los motores en línea y debido a su menor altura tienen un centro de gravedad más bajo. Esto último hace que al ser usados en automóviles y motocicletas, tengan una mejor estabilidad y control.



Figura 2.12 Motor Boxer [11]

2.5.5 Motores radiales

El mayor uso de los motores radiales (Figura 2.13) se da en aviones, más concretamente en avionetas pequeñas. Estos motores están compuestos por una serie de cilindros colocados sobre un mismo plano y giran alrededor del eje del cigüeñal que tiene un único muñón al que van unidas todas las bielas. Al tener una gran área frontal, estos motores no suelen requerir refrigeración mediante agua u otro refrigerante. Pero también el tener mucha área frontal se convierte en un inconveniente porque genera mucha carga aerodinámica.



Figura 2.13 Motor radial [12]

2.5.6 Motores Wankel

Los motores Wankel (Figura 2.14) son mucho menos comunes que los anteriormente mencionados. El funcionamiento es completamente diferente al resto. Es un motor rotativo en el que las etapas de admisión, compresión, combustión y escape se producen de manera simultánea. Las ventajas que presentan son varias: son más pequeños, por lo que pesan menos, tienen menos piezas móviles y tienen una mayor suavidad. Pero también presentan inconvenientes, entre otras están que tienen menos rendimiento y una difícil estanqueidad.

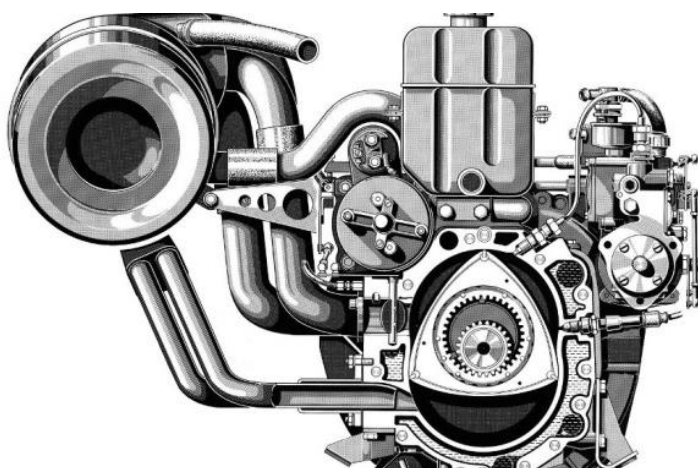


Figura 2.14 Motor Wankel [13]

CAPÍTULO 3: SISTEMAS MULTICUERPO

3.1 Introducción a los sistemas multicuerpo

Un sistema multicuerpo es un sistema formado por varios sólidos rígidos o cuerpos flexibles que están unidos entre sí a través de pares cinemáticos y elementos de fuerza. Los pares cinemáticos son uniones entre sólidos que permiten algunos grados de libertad y restringen otros. En la Figura 3.1 se puede ver un ejemplo de sistema multicuerpo con sus elementos de fuerza y sus uniones [14].

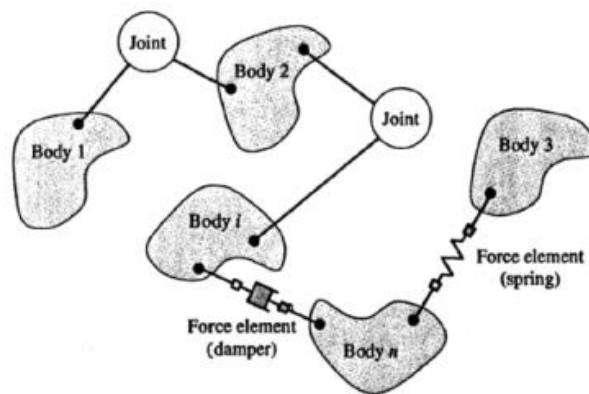


Figura 3.1 Ejemplo de sistema multicuerpo [14]

Los problemas de los sistemas multicuerpo suelen implicar cambios en la geometría y grandes desplazamientos. Debido a estos cambios y a fuerzas exteriores aplicadas, acostumbran a ser problemas no lineales y presentar discontinuidades.

Para simulaciones de sistemas multicuerpo complejos es conveniente disponer de métodos matemáticos robustos y eficientes como por ejemplo un software potente que implemente el cálculo por elementos finitos.

En este tipo de sistemas, para simplificar el análisis dinámico lo que se hace es aislar cada cuerpo y estudiarlo por separado mediante el uso de diagramas de cuerpo libre. Se muestra en cada cuerpo las fuerzas que actúan y se resuelve la Segunda ley de Newton, $\sum F_{ext} = ma$. Una vez se ha hecho este procedimiento con todos los cuerpos, puede unirse los resultados para obtener información sobre el comportamiento del sistema [15].

Cuando se trabaja con mecanismos multicuerpo es importante tener conocimiento del movimiento que tienen los cuerpos que lo componen. En un motor es imprescindible conocer el movimiento que tiene cada componente para poder hacer un diseño correcto del conjunto. En la Figura 3.2 puede verse un motor donde cada pieza describe un movimiento y el que se necesita un conocimiento preciso de cada uno de ellos.

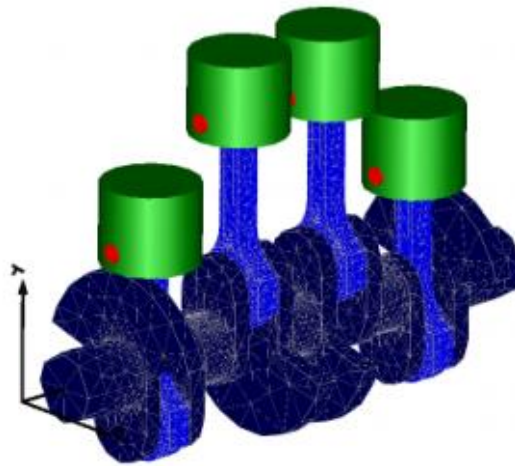


Figura 3.2 Motor como sistema multicuerpo [14]

3.2 Elementos de unión

Como se ha dicho al principio de este capítulo, las uniones en un sistema multicuerpo pueden estar formadas por elementos de fuerza o pares cinemáticos, los cuales introducen algunas restricciones al movimiento en las uniones de los cuerpos.

3.2.1 Elementos de fuerza

Como elementos de fuerza los más importantes que se conocen son los resortes, los amortiguadores y los actuadores

3.2.1.1 Resortes

Los resortes son los elementos de fuerza más utilizados en los sistemas mecánicos. Estos elementos actúan por compresión y generan fuerzas en los puntos de unión que tienen la misma línea de acción y el mismo módulo y sentidos opuestos.

La dirección viene determinada por los puntos de unión de los dos cuerpos y el módulo que tienen es el producto de la rigidez del resorte por el alargamiento que tiene este. Dependiendo de si el muelle está comprimido o traccionado, la fuerza intenta alejar o acercar a los cuerpos que une [14].

En la Figura 3.3 se puede ver la representación de dos cuerpos unidos por resortes.

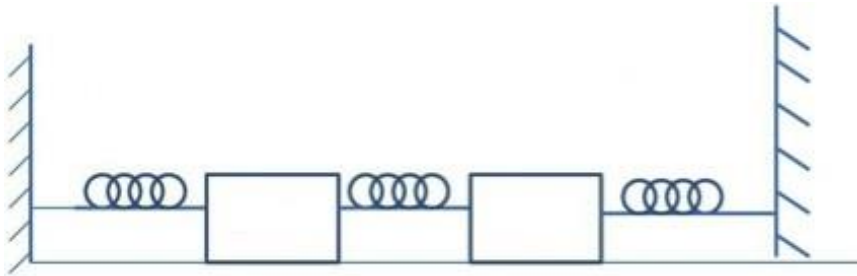


Figura 3.3 Masas unidas por resortes [16]

3.2.1.2 Amortiguadores

Los amortiguadores presentan un comportamiento similar al de los resortes. La diferencia entre ellos es que los amortiguadores dan lugar a la aparición de fuerzas que se oponen a la velocidad relativa entre sus extremos y no al desplazamiento relativo entre los mismos [14].

Las fuerzas que aparecen son el producto del coeficiente de amortiguamiento por la velocidad del punto donde está aplicada la fuerza del amortiguador.

En la Figura 3.4 se puede ver la representación de dos masas unidas por un amortiguador que tiene un coeficiente de amortiguamiento c .

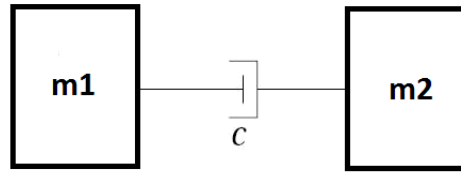


Figura 3.4 Masas unidas por un amortiguador [17]

3.2.1.3 Actuadores

Por último, los actuadores proporcionan una pareja de fuerzas que pueden ser constantes o dependientes del tiempo sobre los cuerpos a los que están unidos. Estas fuerzas comparten la misma línea de acción y tienen el mismo módulo, pero tienen sentidos opuestos. En la Figura 3.5 se representa un actuador unidos a dos cuerpos [18].

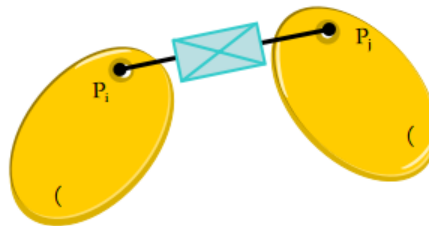


Figura 3.5 Cuerpos unidos por un actuador [18]

3.2.2 Pares cinemáticos

Un par cinemático es la conexión existente entre eslabones, que se encuentra en los nodos de estos eslabones y que permite algún movimiento o movimiento potencial entre los que conecta.

3.2.2.1 Pares de revolución

En los pares de revolución un elemento gira respecto de otro con un único movimiento posible de rotación alrededor de un eje de revolución concreto [3]. Como

se puede ver en la Figura 3.6 cada cuerpo puede girar respecto del otro alrededor del eje determinado [14].

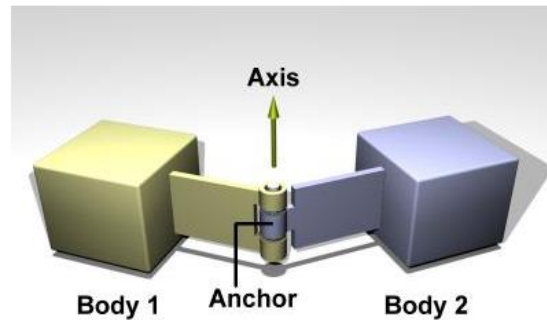


Figura 3.6 Par de revolución [19]

3.2.2.2 Pares esféricos

El par esférico está formado por un sólido esférico que se mueve dentro de otro con la misma forma en el contacto. Su movimiento es de rotación alrededor del centro de la esfera como se puede ver en la Figura 3.7. El movimiento posible de un cuerpo respecto del otro es alrededor de los tres ejes [14].

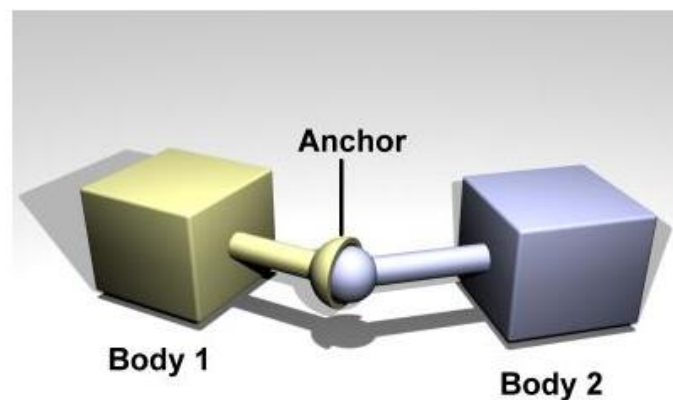


Figura 3.7 Par esférico [19]

3.2.2.3 Pares cilíndricos

Los pares cilíndricos están formados por una unión con un sólido de forma cilíndrica que se aloja dentro de otro sólido con la misma forma. Es por tanto que los

posibles movimientos que ofrece son el de rotación alrededor del eje de unión y el de traslación a lo largo del eje. Este contacto puede verse en la Figura 3.8.

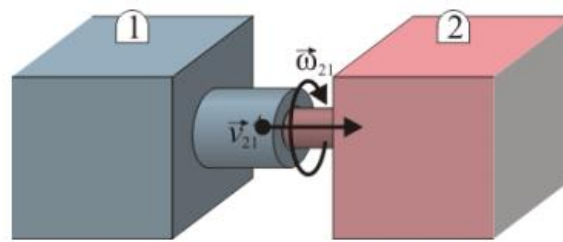


Figura 3.8 Par cilíndrico [19]

3.2.2.4 Pares helicoidales

El par helicoidal se basa en el par cilíndrico con la característica de que la parte cilíndrica está roscada al igual que la parte en la que se aloja este cilindro roscado [5]. El miembro que tiene la superficie de contacto exterior, rosca exterior, se denomina tornillo o barra roscada y el que tiene la superficie de contacto interior, rosca interior, se denomina tuerca [14].

Como en el par cilíndrico los movimientos que permite son la rotación alrededor del eje y la traslación a lo largo del eje. El par helicoidal puede verse en la Figura 3.9.

Figura 3.9 Par helicoidal [19]

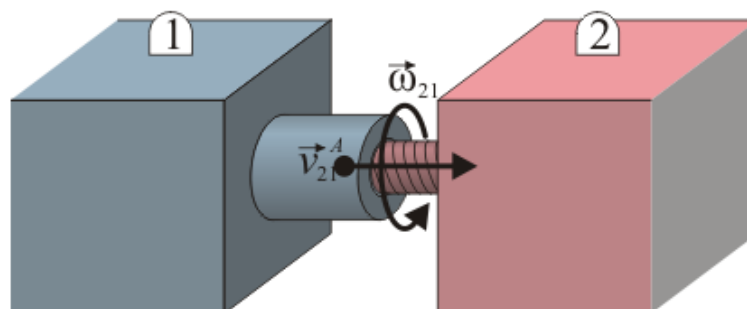


Figura 3.9 Par helicoidal [19]

3.2.2.5 Pares planos

Los pares planos están formados por sólidos de caras planas y paralelas. El movimiento relativo que se tiene es la traslación en el plano paralelo existente entre ambos cuerpos.

Los movimientos permitidos son las traslaciones en los dos ejes del plano y la rotación alrededor del eje perpendicular al plano que forman. En la Figura 3.10 puede verse tanto el contacto como los movimientos permitidos.

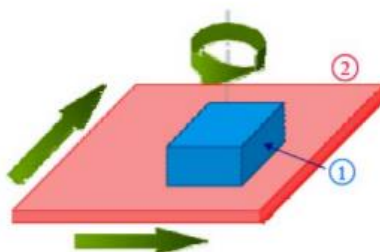


Figura 3.10 Par plano [19]

3.3 Tipos de coordenadas

Al trabajar en un sistema multicuerpo es importante tener claro los diferentes tipos de sistemas de coordenadas que puede haber en el sistema. Hay que saber elegir bien el sistema de coordenadas más apropiado para el tipo de mecanismo que se desea analizar y saber respecto de que sistema de referencia se realizan las uniones entre cuerpos. Se pueden definir dos grupos de coordenadas:

- Coordenadas Independientes: dan lugar a una modelización con tantas coordenadas como grados de libertad se tiene en el sistema. Se trata del número mínimo de coordenadas posibles.
- Coordenadas Dependientes: son las coordenadas usadas cuando el número de grados de libertad del sistema es menor que el número de coordenadas existentes [15].

3.3.1 Coordenadas globales

Las coordenadas globales son las principales dentro de un sistema. Son la referencia global XYZ para todo cuerpo presente en el sistema.

3.3.2 Coordenadas locales

Las coordenadas locales son el sistema de referencia que está ligado a cada uno de los cuerpos que componen el sistema y que evolucionan de manera solidaria con el sistema de coordenadas globales. En la Figura 3.11 puede verse un sistema de coordenadas locales junto con el de coordenadas globales.

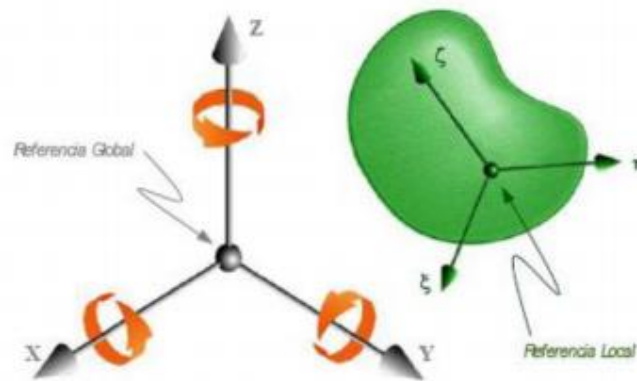


Figura 3.11 Sistema de referencia local junto a sistema de referencia global [14]

Cuando se especifica la posición de un cuerpo con estas coordenadas, tan solo se tiene que indicar las coordenadas globales del origen del sistema de referencia local que evoluciona de manera solidaria con él. En cuanto a la orientación es suficiente con expresar el ángulo que indique su orientación del sistema global en sistemas planos. En el espacio será necesario proporcionar las tres coordenadas angulares para definir la orientación [14].

3.3.3 Coordenadas relativas

Las coordenadas relativas son las que expresan las distancias X e Y respecto del último punto. Al trabajar con estas coordenadas en lugar de definir la posición y orientación con respecto al sistema global lo que se hace es referirlas al miembro contiguo mediante una distancia, un ángulo o una combinación de ambos.

Para posicionar cada elemento con estas coordenadas se necesitan normalmente menos parámetros que usando las locales. Solo se necesita una variable por cada grado de libertad permitido en el movimiento relativo entre el cuerpo que se pretende localizar y el cuerpo respecto al cual se están refiriendo las coordenadas [14].

CAPÍTULO 4: ESTUDIO DE ANÁLISIS MODAL

4.1 Análisis modal

El análisis modal de un cuerpo consiste en la determinación de las frecuencias propias y los modos de vibración que tiene dicha estructura. En estos problemas se necesita la resolución de ecuaciones diferenciales y la complejidad que tiene este estudio viene determinada por el número de grados de libertad que se tengan en el sistema. En el caso de que se tenga una situación en la que hay un único grado de libertad la ecuación diferencial que hay que resolver serán del tipo:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$$

Donde:

- m es la masa del sistema.
- c el coeficiente de amortiguamiento.
- k la constante de rigidez.
- x es la posición en el tiempo de la masa.

En la Figura 4.1 puede verse una representación de un sistema de un grado de libertad con un resorte de rigidez k y un amortiguador de coeficiente de amortiguación c .

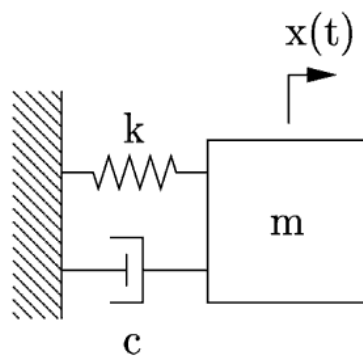


Figura 4.1 Sistema de un grado de libertad con resorte y amortiguador [20]

En el caso de que no se tenga amortiguamiento como es el caso de este proyecto, se tiene una expresión:

$$m\ddot{x} + kx = 0$$

Teniendo que resolver la siguiente ecuación para obtener las frecuencias propias, representadas por ω :

$$k - m\omega^2 = 0$$

Estas ecuaciones presentadas son únicamente para resolver sistemas de un grado de libertad. En el caso de tener dos o tres grados de libertad, también se puede resolver a mano aunque es un proceso más largo ya que se introducen matrices en el proceso. Se pueden encontrar matrices de masa, de amortiguamiento si hubiera, y de rigidez. La expresión que se tiene en este caso (sin amortiguamiento), y la que hay que calcular para obtener las frecuencias propias es:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0$$

$$[K] - [M]\omega^2 = 0$$

Donde:

- $[M]$ es la matriz de masas.
- $[K]$ es la matriz de rigideces.
- $\{x\}$ es el vector de posiciones de las masas en el tiempo.

La ecuación solución de esta expresión para dos grados de libertad es una ecuación cuadrática. Al ir aumentando los grados de libertad, va aumentando el grado de la ecuación necesaria para obtener las frecuencias propias.

El uso de los software de elementos finitos para este tipo de estudios, permite poder obtener las vibraciones propias cuando se tienen una gran cantidad de grados de libertad o cuando se tienen sistemas continuos. Un sistema continuo es complicado de resolver debido a que las propiedades inerciales, disipativas y elásticas están distribuidas a lo largo de toda la geometría. En él es necesario definir la posición de todos los puntos del sistema, por lo que un sistema continuo es equivalente a tener un sistema de infinitos grados de libertad.

La complejidad del estudio hace necesaria el uso de un software de elementos finitos. Lo que el programa hará será pasar las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que aparecen en el problema, a ecuaciones algebraicas. Este paso simplifica la resolución del problema, pero no lo suficiente como para resolverlo de manera analítica, ya que las matrices que se tienen son muy grandes. El ordenador no tiene problemas en realizar cálculos con matrices de estas dimensiones y puede aportar una solución.

4.2 Elementos finitos

A la hora de utilizar un material u otro hay que saber cómo se comportan estos frente a diferentes sollicitaciones. Para poder caracterizar mecánicamente a los materiales se realizan ensayos mecánicos con el fin de poder determinar sus propiedades o su idoneidad para aplicaciones en servicio. Estos ensayos, por lo general destructivos, necesitan probetas (muestras de material con tamaños y formas establecidos), máquinas de ensayos (que requieren personal cualificado y consumen energía), y un software específico que ayude a interpretar los datos obtenidos. Además no todos los ensayos son iguales. Dependiendo del estudio que se quiere hacer del material, o de la futura aplicación que este tendrá, el ensayo resultará de una manera u otra. Es por ello que conocer el comportamiento de un material haciendo múltiples ensayos es muy costoso. Afortunadamente estos métodos de estudio han quedado prácticamente en desuso con la aparición de software de simulación. Haciendo uso de ellos no se abandona por completo los ensayos, pero se consigue llegar a un modelo muy aproximado sin necesidad de estar realizando ensayos una y otra vez.

El método de elementos finitos, en términos matemáticos, es una técnica numérica para resolver problemas descritos como un conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Haciendo uso de los elementos finitos se puede analizar cualquier tipo de geometría y aplicarle cualquier tipo de carga en ella.

Para hacer un estudio usando un software de elementos finitos, se parte de la geometría. Se diseña esta en el mismo programa o bien se importa desde otro software. Se le aplica un tipo de material que tiene asociadas unas determinadas propiedades. Se asignan las restricciones pertinentes acorde con el estudio que se esté realizando y se le aplican las cargas correspondientes al estudio que se quiera realizar.

El siguiente paso es el más importante en este tipo de estudios: el proceso de mallado. Consiste en dividir la geometría en pequeñas celdas, conocidas como nodos. Estos nodos se conectan para formar elementos finitos que juntos forman el volumen de la geometría. En cada uno de ellos se resuelven, por separado, las ecuaciones diferenciales requeridas en el proceso. El mallado puede ser distinto según el tipo de estudio que se quiera hacer y cuanto mejor sea la malla que se realice, mejor son los resultados que se obtengan. El tamaño de los nodos puede ser diferente dependiendo de la región de la pieza en la que se esté trabajando. De esta manera, se tienen nodos más pequeños allí donde la sección esté más solicitada (por ejemplo, el frontal del coche en un análisis aerodinámico), o en zonas más susceptibles a sufrir cambios físicos (como por ejemplo agujeros o cambios de sección). Una vez se tiene hecho el mallado del elemento a estudiar, se puede realizar el análisis y obtener los resultados.

Algunas de las variables que se pueden analizar son las tensiones, las deformaciones, los esfuerzos, los modos propios de vibración, los aumentos de temperatura etc.

4.3 Simpack

Simpack (Figura 4.2) es un programa de simulación de múltiples cuerpos (MBS que significa según sus siglas en inglés *Multi-Body Simulation*), que se utiliza para el análisis dinámico de cualquier sistema mecánico o mecatrónico. Al ser uno de los programas usados en este proyecto, se llevará a cabo un análisis más detallado.

En este software se permite a los usuarios generar y resolver modelos tridimensionales con el fin de visualizar y predecir el movimiento, las fuerzas de acoplamiento o las tensiones que pueden aparecer en cada cuerpo.

Este software es usado en una gran cantidad de industrias, siendo las más principales la industria automotriz, motores, transmisión de energía, industria ferroviaria y aeronáutica o sectores industriales. También puede aplicarse a cualquier rama de la ingeniería mecánica.

Simpack está especialmente bien adaptado a la alta frecuencia y las vibraciones que se producen en este rango así como a los análisis de transitorios, incluso en el rango acústico. También está muy bien adaptado para análisis dinámicos de sistemas complejos. Motores de combustión con más de 3000 grados de libertad y múltiples componentes flexibles han sido analizados de manera satisfactoria. Fue desarrollado para poder manejar modelos no lineales de elevada complejidad. Aunque hacer uso de este software puede ser más complicado que otros software de simulación, Simpack tiene un gran potencial y al estar orientado a tantos sectores industriales, tiene una gran aceptación en la industria.



Figura 4.2 Logotipo de Simpack [21]

Como se ha comentado Simpack ofrece módulos especializados en diferentes sectores de la industria. Se va a comentar algunos de los más relacionados con el tema de este proyecto.

El módulo *Automotive* permite crear modelos de vehículos para una amplia gama de aplicaciones industriales. Esto incluye todo tipo de vehículos, desde automóviles a camiones, motocicletas o vehículos de uso industrial. Los usuarios tienen acceso a todo tipo de elementos referente a estos vehículos, como por ejemplo llantas, pavimentos o bujes. Se pueden hacer diferentes estudios según lo que se esté buscando, pueden ser análisis de manipulación, confort, paseo, línea de conducción, etc. Algunos de los estudios que se pueden realizar son el comportamiento que tiene el contacto de asfalto con neumático, la estabilidad de la suspensión o la generación de movimiento desde el motor hasta las ruedas.

En el módulo *Engine* se podrán realizar estudios tanto de un motor completo como de partes de él analizadas por separado. En la Figura 4.3 puede verse un motor diseñado en Simpack [21]. Pueden realizarse estudios como cálculos de tensores hidráulicos con descripciones detalladas de los flujos de aceite o las propiedades del combustible usado. También estudios sobre las fuerzas ejercidas por los gases de combustión que generan el movimiento en el motor sobre los elementos involucrados en el proceso o realizar estudios de simulaciones del comportamiento de las cadenas con los engranajes correspondientes. El programa permite también calcular en estos casos la fricción en los contactos o la fuerza que debe ser ejercida para mover el conjunto.



Figura 4.3 Motor generado en Simpack []

Por último el módulo *Flexible* donde se permite elaborar estudios haciendo uso del método por elementos finitos. Se podrán hacer cuerpos flexibles de todo tipo de estructuras, desde elementos de un motor, hasta vagones de trenes o chasis de coches. Se estudiarán las tensiones y esfuerzos, las deformaciones o las fricciones en

los contactos entre otras cosas. Dentro de este módulo se tiene el submódulo *FlexModal* que se usa para importar cuerpos flexibles desde otros programas y donde se puede realizar el análisis modal de un cuerpo. Se usa típicamente en ferrocarriles, chasis de automóvil, cigüeñales de motor, turbinas de viento, etc. Los programas desde los cuales se puede realizar la importación de cuerpos flexibles son Ansys, Abaqus y Nastran [21]. A continuación se presentan los tres, aunque con más detalle Ansys ya que es el que se usa finalmente para la importación.

Como manera breve de comentar el funcionamiento del sistema se puede decir que se trabaja dándole mucha importancia a los contactos que deben tener los cuerpos entre sí. Se crean marcadores para poder realizar posteriormente las uniones o para implementar en esos marcadores diferentes excitaciones al sistema. Simpack cuenta con una gran librería donde se encuentran las piezas necesarias para trabajar en cada módulo.

4.4 Software para la importación del cuerpo flexible

4.4.1 Ansys

Ansys (logotipo en Figura 4.4), es un software de simulación ingenieril que está desarrollado para funcionar bajo la teoría de elementos finitos para estructuras y volúmenes finitos para fluidos. El programa está dividido en tres módulos principales. El primero de ellos, el pre-procesador está orientado a la creación de la geometría y el mallado. En él se construye la geometría del problema y se añaden también los materiales que se usarán para el modelo junto con sus propiedades. Después se genera la malla de manera apropiada con el tipo de análisis que se quiera realizar sobre la geometría. La malla puede generarse tanto a mano como usando las herramientas de generación automática. Realizar una malla a mano te proporciona mejores resultados, ya que te obliga a realizar un mallado más fino allí donde se produzcan mayores cambios físicos sobre la geometría.

El segundo es el procesador, donde se realiza la aplicación de las cargas y las condiciones de contorno. Incluye la resolución de problemas de análisis de estructuras dinámicas y estáticas, análisis de transferencia de calor, análisis fluidodinámicos y problemas de acústica y electromagnetismo. También se hace una selección de los datos que se quieren obtener tras la resolución del problema. Por último, el tercer módulo es el post-procesador. En él se pueden visualizar los resultados obtenidos, tanto en gráficas con los valores correspondientes, como en figuras con los resultados.

Este programa ofrece diferentes productos, en los cuales se puede realizar diferentes tipo de estudios. Los más importantes y usados son:

- Ansys Workbench: es la plataforma donde se generan las geometrías, y los mallados. Una vez hecho esto se pueden importar las geometrías malladas a otras plataformas para realizar estudios específicos o bien se pueden hacer análisis mecánicos dentro de esta plataforma.
- Ansys Fluent: esta parte de Ansys es la especializada en realizar estudios fluidodinámicos. Se pueden modelar flujos, turbulencias, transferencias de calor y reacciones para aplicaciones industriales.
- Ansys HFSS: esta herramienta es la especializada en la simulación en 3D de campos electromagnéticos de onda completa y es muy importante en el diseño de alta frecuencia y para el diseño de componentes de alta velocidad [22].



Figura 4.4 Logotipo de Ansys [22]

Este software de simulación es, junto con Simpack, uno de los dos programas usados en este proyecto, ya que es con ellos con los que se realiza el estudio de análisis modal. En concreto, para esta parte de Ansys se usa el módulo de Ansys APDL, cuyo acrónimo significa *Ansys Parametric Design Language*. Este módulo está basado en un lenguaje de programación de gran alcance que permite parametrizar un modelo y someterlo a estudios comunes. Este módulo no se caracteriza por poder realizar el diseño de la geometría, pero se puede importar el modelo que se quiere estudiar desde otros programas más avanzados en el ámbito del diseño. Eso es lo que se realiza, ya que se importa la geometría del cigüeñal desde el software Solid Edge.

Por otra parte, este módulo puede recuperar información de la base de datos de Ansys, tales como información específica de los nodos de la malla como por ejemplo su ubicación dentro de esta, el tipo de elemento que la compone, o en que nodos se genera la máxima tensión. Como todo software de simulación también se puede realizar estudios del modelo. El análisis modal es el estudio que se realiza en este módulo.

Al estar basado en un lenguaje de programación, se permite definir abreviaturas, a modo de atajos, para comandos que se usen de manera frecuente. También se podrá introducir líneas de código en la barra de comandos para realizar tareas o análisis.

4.4.2 Abaqus

Abaqus (logotipo en Figura 4.5) es un software de simulación que aplica el método de elementos finitos para realizar una gran variedad de análisis. Algunos de los estudios más requeridos son los siguientes: estudios estructurales lineales y no lineales, dinámicos incluyendo impactos, problemas de contacto entre sólidos, análisis térmicos, estudios acústicos y análisis fluidodinámicos. El proceso para realizar estudios en este software es intuitivo y estructurado. El programa va guiando al usuario en los pasos que debe ir realizando.

Este software cuenta con cuatro productos. Abaqus CAE (cuyo acrónimo es “*Complete Abaqus Environment*”) donde se puede realizar modelizaciones, mallar las geometrías y analizar componentes o conjuntos mecánicos. También se puede visualizar los resultados del cálculo de elementos finitos. Pueden ser importadas geometrías a partir de los formatos CAD más comunes para ser analizadas. Este módulo podría decirse que es el principal y que el resto de ellos están implementados dentro de él.

Por otro lado también se tiene Abaqus CFD (“*Computational Fluid Dynamics*”), que proporciona avanzadas capacidades computacionales de dinámica de fluidos. Cabe resaltar su capacidad de poder hacer simulaciones acopladas con interacción fluido-estructura tanto de tipo estructural como térmico.

El siguiente producto es Abaqus Standard, que permite resolver los tradicionales análisis de elementos finitos de tipo implícito, tales como análisis estáticos, dinámicos a baja velocidad (tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia), térmicos, etc.

Por último está Abaqus Explicit, en esta parte es un solucionador para análisis dinámicos a muy alta velocidad y análisis quasi-estáticos, en los cuales las no linealidades son patentes, tales como grandes deformaciones o contactos. Algunos ejemplos de este tipo de aplicaciones serían los análisis de colisión en la industria del automóvil, balística o test de caída libre [23].

Abaqus permite comenzar un análisis en Abaqus Standard y utilizar los resultados como condiciones iniciales de un análisis en Abaqus Explicit, y viceversa.



Figura 4.5 Logotipo de Abaqus [23]

4.4.3 Nastran

Nastran (logotipo en Figura 4.6), es un software de simulación y análisis por elementos finitos adaptable a diferentes entornos de ingeniería. Nació como un programa de análisis de elementos finitos financiado por el gobierno estadounidense y desarrollado por la NASA para realizar cálculos estructurales en proyectos espaciales y aeronáutico, es por ello que este software está muy implementado en el sector aeronáutico. El nombre de Nastran viene de “NASA STRUCTURAL ANALYSIS PROGRAM”.

La estructura del programa puede decirse que es una mezcla entre el módulo Workbench de Ansys y el software Abaqus. La estructura es muy similar a Workbench ya que cuenta con una zona en la parte izquierda de la pantalla donde se especifican las etapas que se tienen que ir realizando. Esta guía en el proceso es la similitud que se encuentra con Abaqus. Una vez se ha diseñado la geometría o el ensamblaje, se añade el material con sus propiedades y posteriormente se aplican las cargas y las restricciones. Un proceso que siguen la mayoría de los software de simulación mediante elementos finitos. Por último se pasa al análisis de los resultados [24].



Figura 4.6 Logotipo de Nastran [24]

4.5 Antecedentes

El análisis de las vibraciones propias de un cigüeñal es un estudio realizado habitualmente debido a la importancia que tiene este elemento dentro de un motor de combustión interna alternativo. Respecto tema se va a detallar dos estudios realizados por diferentes autores.

El primero de los estudios a mencionar es el que se realizó en la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca, Ecuador. El nombre de la Tesis fue *“Análisis estático de frecuencias naturales del cigüeñal y volante de inercia del vehículo Hyundai Accent”*. En él se realizó el análisis de frecuencias naturales del volante de inercia y del cigüeñal con el fin de obtener los modos de vibración de las seis primeras frecuencias, para tener conocimiento de los posibles problemas que se pueden dar en estos dos elementos. Los resultados a los que llegaron fueron que teniendo en cuenta que las velocidades de giro de estos dos componentes están comprendidas entre las 800 y las 6300 rpm, que equivalen a unos valores de entre 13.3 Hz y 105 Hz, en ningún momento se alcanzarían las frecuencias propias ya que estas frecuencias están muy por encima de estos valores [25].

El siguiente estudio fue llevado a cabo en la University of Technology, Zibo, Shandong, China. Su título era *“Finite Element Analysis of 4-Cylinder Diesel Crankshaft”*. En este análisis se usó Ansys para realizar el estudio de vibración por elementos finitos. También efectuó un análisis de las tensiones y los esfuerzos en el cigüeñal. Las conclusiones a las que se llegaron fueron que las deformaciones máximas aparecen en el centro de las muñequillas del cigüeñal. Las tensiones máximas las encontraron en la unión del eje del cigüeñal y los brazos de este. En cuanto a las frecuencias propias, determinaron simplemente que pueden ser evitadas si se hace un diseño apropiado de la estructura [26].

CAPÍTULO 5: DISEÑO DEL MOTOR

En este capítulo se analiza como se han realizado los diseños de cigüeñal y motor en los respectivos programas que se han usado para ello. El cigüeñal se realiza en el software de diseño Solid Edge, y el resto de los componentes del motor son realizados en el programa Simpack.

5.1 Diseño del cigüeñal en Solid Edge

El cigüeñal es el elemento protagonista en este proyecto, y es diseñado y creado en el programa de diseño asistido Solid Edge. Este software solo permite el modelado de piezas y conjuntos. Solid Edge tiene compatibilidad de archivos de piezas o conjuntos con una gran cantidad de programas. Es por ello que lo se usa para generar el cigüeñal y después importarlo a Ansys.

Lo primero que se hace es abrir un nuevo archivo. Antes de comenzar con el diseño del cigüeñal, se determinan las medidas que tiene nuestro elemento. Los diámetros de las diferentes partes pueden verse en la Tabla 5.1.

Parte	Diámetro [mm]
Eje	35
Muñequilla	30
Parte menor del brazo	35
Parte mayor del brazo	60

Tabla 5.1 Medidas de los diámetros de las diferentes partes

Y las distancias de cada parte en la dirección longitudinal pueden verse en la Tabla 5.2.

Parte	Longitud [mm]
Eje en los extremos	30
Eje entre brazos	20
Brazos	20
Muñequilla	40

Tabla 5.2 Medidas de las longitudes de las partes

Una vez están definidos ya los diámetros y las longitudes, se procede a crear el cigüeñal. Se empieza diseñando el eje del elemento. Para ello se realiza un círculo de 35 mm con una protusión de longitud 30 mm . Lo siguiente que se hace es realizara el perfil del brazo del cigüeñal sobre la cara posterior del eje creado. Los diámetros de la parte menor y mayor del brazo ya han quedado definidos en la Tabla 4.1; la distancia desde el centro del eje al círculo de la parte menor es de 42.5 mm y a la parte mayor es de 30 mm . Teniendo una longitud total del brazo de 120 mm . Se pueden ver las medidas en la Figura 5.1. Se une finalmente los círculos de la parte menor y mayor con dos tangentes.

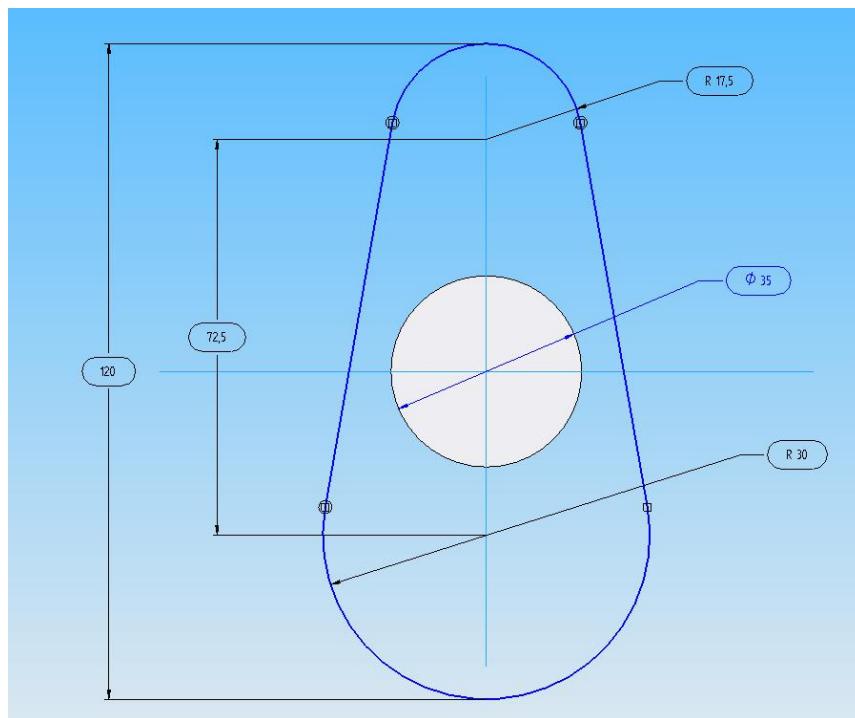


Figura 5.1 Detalle de las medidas del eje y el perfil del brazo (Solid Edge)

Una vez se tiene ya generado el perfil del brazo, se hace la protusión del mismo con una longitud de 20 mm . A continuación lo que se hace es la muñequilla, para lo que se selecciona la cara del brazo donde no se tiene el eje, y sobre la parte menor se realiza un círculo concéntrico al del perfil con un diámetro de 30 mm , dejando una holgura de 5 mm , y se le da una profundidad a la protusión de 40 mm . Una vez se ha hecho esto, se vuelve a realizar otro brazo. Se añade ahora la parte de eje que une los brazos. Como se puede ver en la Figura 5.2, esto es lo que se ha realizado hasta ahora.

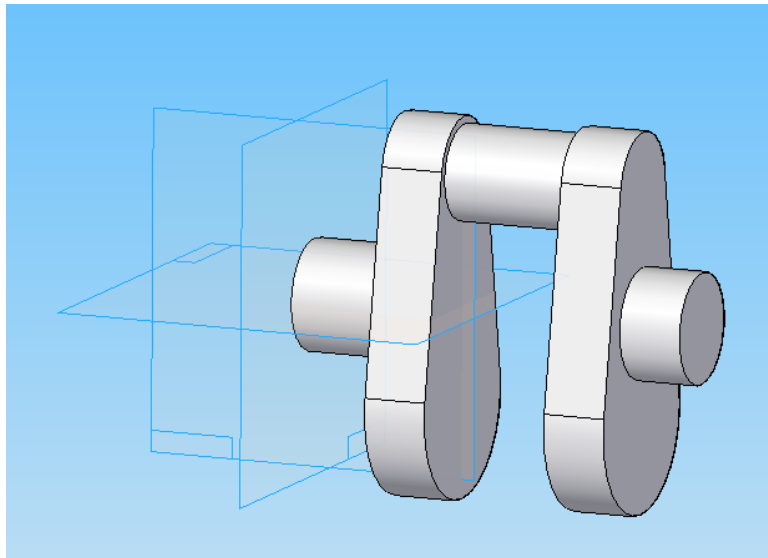


Figura 5.2 Parte del cigüeñal generado (solid Edge)

Todos los brazos tienen el mismo perfil con las mismas dimensiones, pero algunos de ellos están colocados de manera opuesta ya que en el ciclo que realiza el motor cuando unos pistones están en el punto muerto superior, los otros están en el inferior. Por lo que una vez estén generados se tiene que realizar un giro de 180° a partir del eje del cigüeñal.

Se continúan realizando las operaciones hasta tener el elemento terminado. Las longitudes de cada parte se detallaron en la Tabla 5.2, dando en total una longitud del cigüeñal de 440 mm , como se puede ver en la Figura 5.3.

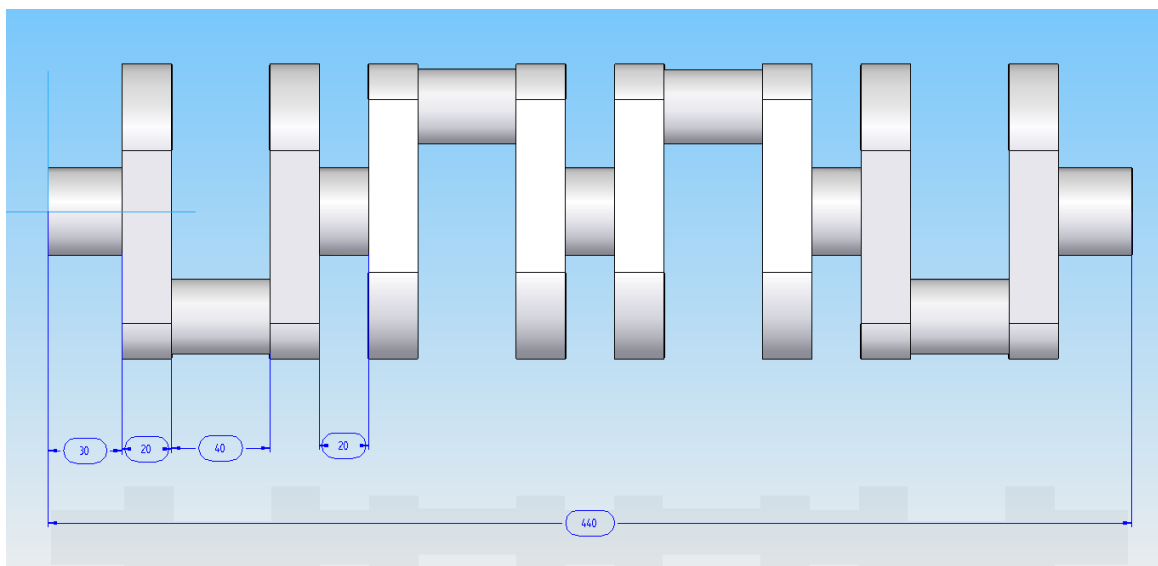


Figura 5.3 Detalle de la longitud de cada parte y la longitud final (Solid Edge)

Detalle de la longitud de cada parte y la longitud final. El aspecto final que tiene el cigüeñal es la que se muestra en la Figura 5.4.

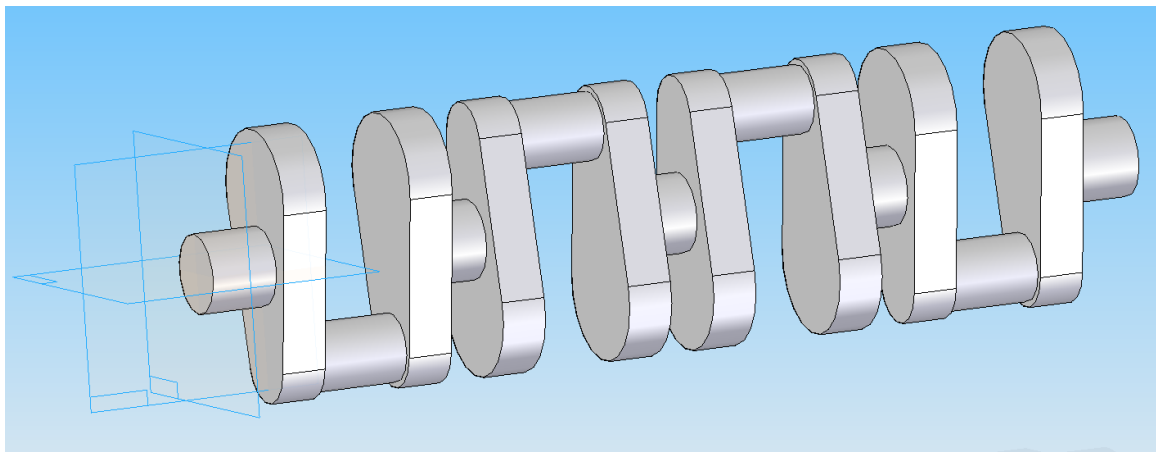


Figura 5.4 Cigüeñal completo (Solid Edge)

Una vez se tiene el cigüeñal hecho, se procede a continuación a guardarlo de la manera correcta para después poder abrir la geometría en Ansys. Uno de los formatos compatibles con este último es la extensión “.iges”, por lo que se guarda el archivo con esta extensión. Al seleccionar este formato, Solid Edge nos genera un archivo, que por defecto viene configurado en pulgadas. Es por esto que se tiene que hacer una operación antes de guardarlo definitivamente. Se entra en las opciones de guardado y allí se cambia milímetros por pulgadas. Una vez se ha hecho esto, ya se tiene el archivo de la geometría.

5.2 Diseño del motor en Simpack

En Simpack se realiza el diseño y creación de un motor de combustión interna alternativo de cuatro cilindros en línea. La versión que se usa en este proyecto es la de SIMPACK 9.7 (64bits). Se crean los componentes principales uno a uno, y posteriormente se realiza el ensamblaje de todos los elementos para crear el motor. Las piezas que se crean son el cigüeñal, las bielas, los pistones y el bloque motor. El bulón que une la biela con el pistón es creado de manera conjunta dentro del pistón como una geometría que se une a este elemento. Los cilindros son representados como restricciones de movimiento para los pistones, ya que estos solo pueden tener movimiento vertical y que el motor creado es un motor con cilindros sin camisa, por lo que los cilindros están integrados dentro del bloque motor. Se añaden por tanto los

cilindros como restricciones para que el motor sea más visual. Por último se detallan algunas de las especificaciones del motor que pueden ser obtenidas a partir de la geometría del mismo.

Para realizar cada componente, lo que se hace es crear un nuevo cuerpo. Por defecto aparece un cubo, que puede ser borrado, y se sustituye por el elemento que se quiere crear.

Todos los elementos excepto el cigüeñal son obtenidos de la librería que proporciona Simpack de componentes específicos de cada módulo [27]. Por tanto lo único que se tiene que insertar son las dimensiones apropiadas para cada elemento. Del cigüeñal no se aporta una geometría base, lo que se proporciona son los brazos del mismo. Lo que se hace entonces es crearlo poco a poco, insertando cilindros que van uniendo cada uno de los brazos que tiene el cigüeñal.

5.2.1 Cigüeñal

El cigüeñal es el primer elemento que se crea. Se genera la misma geometría que se ha hecho en Ansys para realizar los análisis modales. Como se ha comentado se va creando a base de cilindros y brazos de cigüeñal que pueden obtenerse de la biblioteca de Simpack [27]. Para crear cada uno de ellos tan solo hay que añadir una nueva geometría al cuerpo principal e indicar que tipo de geometría se añade junto con sus coordenadas y sus giros. Para ello se va a *Cigüeñal_Rigido > Bodies > \$B_Cigüeñal_Rigido > Geometry* y es ahí donde se crea cada nueva geometría.

Se empieza creando el extremo del eje del cigüeñal, después el primero de los brazos y a continuación la primera muñequilla. Se va creando los distintos elementos en un proceso mecánico, teniendo cuidado de poner las coordenadas y los giros correctos a cada elemento. En la Tabla 5.3 Coordenadas y giros de los cuerpos que componen el cigüeñal pueden verse las coordenadas de cada uno de los elementos integrados en el cigüeñal.

Elemento	Coordenadas [mm]			Giros [°]		
	X	Y	Z	α	β	γ
Eje exterior 1	0	15	0	0	0	0
Brazo 1	0	40	-30	90	0	0
Muñequilla 1	0	70	42.5	0	0	0
Brazo 2	0	100	-30	90	0	0
Eje 1	0	120	0	0	0	0
Brazo 3	0	140	30	90	0	180
Muñequilla 2	0	170	-42.5	0	0	0
Brazo 4	0	200	30	90	0	180
Eje 2	0	220	0	0	0	0
Brazo 5	0	240	30	90	0	180
Muñequilla 3	0	270	-42.5	0	0	0
Brazo 6	0	300	30	90	0	180
Eje 3	0	320	0	0	0	0
Brazo 7	0	340	-30	90	0	0
Muñequilla 4	0	370	42.5	0	0	0
Brazo 8	0	400	-30	90	0	0
Eje exterior 2	0	425	0	0	0	0

Tabla 5.3 Coordenadas y giros de los cuerpos que componen el cigüeñal

En la Figura 5.5 puede verse el cigüeñal completo con todas sus geometrías incorporadas.

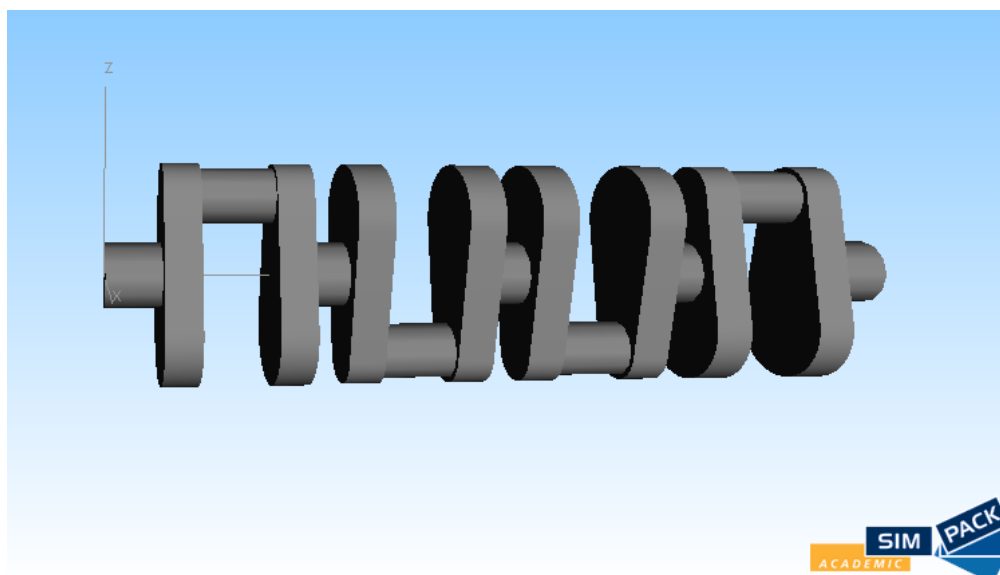


Figura 5.5 Geometría del cigüeñal completo (Simpack)

Por último se añaden los marcadores con los que posteriormente se realiza el ensamblaje del motor. Para ello se crean cinco marcadores, cuatro de ellos son para conectar al cigüeñal cada una de las bielas y el quinto es para conectar el cigüeñal al bloque motor.

Para crear un marcador se tiene que ir a *Cigüeñal_Rigido > Bodies > \$B_Cigüeñal_Rigido > Markers*. Se van creando uno a uno los marcadores del cigüeñal cuyas coordenadas pueden verse en la Tabla 5.4. Y el cigüeñal con todos los marcadores creados puede verse en la Figura 5.6.

Marcador	Coordenada X []	Coordenada Y	Coordenada Z
Bloque	0	-5	0
Biela 1	0	70	42.5
Biela 2	0	170	-42.5
Biela 3	0	270	-42.5
Biela 4	0	370	42.5

Tabla 5.4 Coordenadas de los marcadores del cigüeñal

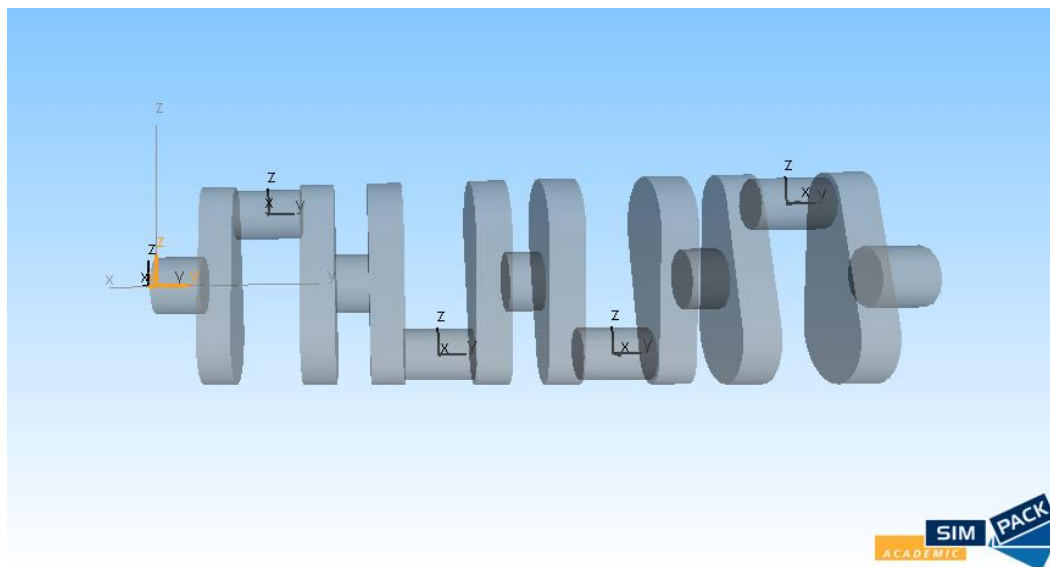


Figura 5.6 Cigüeñal con sus marcadores (Simpack)

5.2.2 Bielas

Para diseñar la geometría de la biela se parte de las dimensiones que tiene el cigüeñal y de las especificaciones de los parámetros que forman la biela en la guía de Simpack. El diámetro de las muñequillas del cigüeñal, que son donde van a ir acopladas las bielas, es de 30 mm . Por tanto el diámetro del agujero de la cabeza de la biela debe de ser de 30 mm también.

Otra dimensión que se obtiene del cigüeñal es la distancia que hay desde el centro del eje principal del cigüeñal, hasta el centro del eje de las muñequillas. Esta distancia es la longitud del radio del círculo según el cual las muñequillas giran en torno al eje principal del cigüeñal (l), y tiene un valor de 42.5 mm . Con esta distancia y con las relaciones geométricas necesarias [2], se puede ir obteniendo las dimensiones que forman la biela.

Las relaciones necesarias para ir obteniendo parámetros de la biela son las siguientes:

$$\frac{1}{5} < \lambda < \frac{1}{2.5}$$
$$\lambda = \frac{l}{L}$$

Donde λ es un número adimensional que relaciona la longitud l con la longitud entre centros de los agujeros de la biela L .

Se tiene un valor de $l = 42.5\text{ mm}$, y el valor de λ se puede elegir entre los valores que está comprendido. EL valor que se escoge para este parámetro es $\lambda = 0.283$. Por lo que se obtiene una longitud entre centros de los agujeros de la biela de $L = 150\text{ mm}$.

A partir de los valores del diámetro del agujero de la cabeza de la biela y de la longitud entre centros de los agujeros de la biela, se puede ir obteniendo valores para el diseño. Se elige un diámetro del agujero del pie de la biela, donde va acoplado el bulón, de 20 mm . El resto de parámetros que nos aporta Simpack y que pueden verse en la Figura 5.7 se van completando hasta tener la biela completa. Los valores asociados a cada parámetro pueden verse en la Figura 5.8.

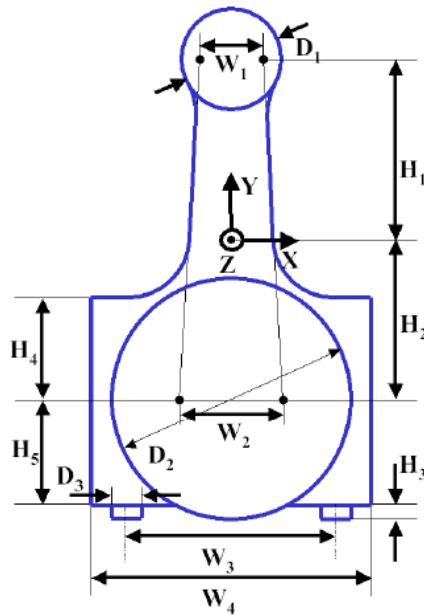


Figura 5.7 Parámetros de la biela obtenidos de Simpack [27]

3: H1 Small eye position:	0.075
4: D1 Small eye diameter:	0.02
5: H2 Big eye position:	-0.075
6: D2 Big eye diameter:	0.04
7: W1 Width upper conrod bar:	0.01
8: W2 Width lower conrod bar:	0.025
9: W3 Width screw position:	0.03
10: W4 Width lower conrod:	0.06
11: R1 Smoothing radius upper:	0.002
12: R2 Smoothing radius lower:	0.002
13: H3 Screw height:	0.004
14: D3 Screw diameter:	0.008
15: L0 Depth conrod bar:	0.0125
16: L1 Depth small eye:	0.015
17: L2 Depth big eye:	0.015
18: H4 Upper plate height:	0.03
19: H5 Lower plate height:	0.03

Figura 5.8 Valores para los parámetros de la biela

La geometría final de la biela después de introducir los valores de los parámetros es la que se muestra en la Figura 5.9. Se le da un color diferente al elemento para que en el ensamblaje se pueda distinguir bien cada uno de los componentes.

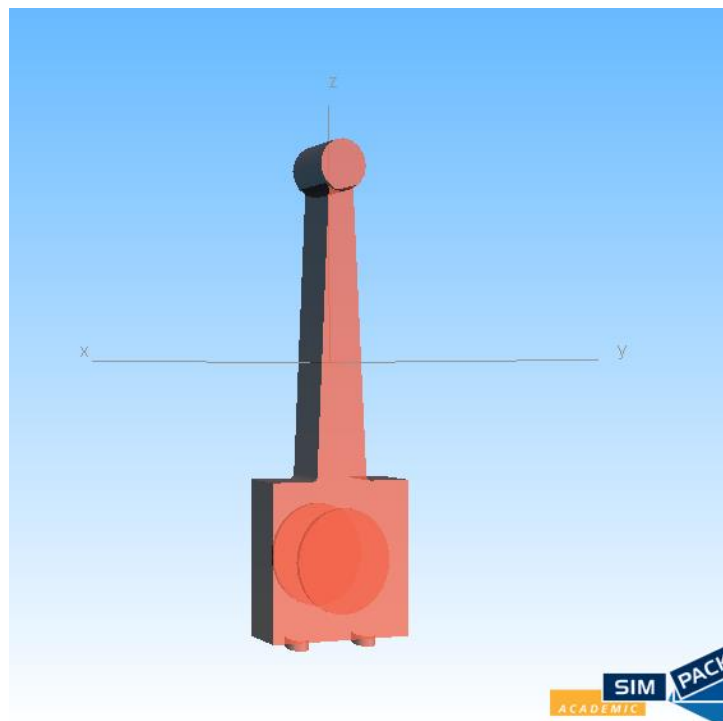


Figura 5.9 Geometría final de la biela (Simpack)

Los marcadores que se van a introducir en la biela son los correspondientes a la unión que debe tener este elemento con el cigüeñal y con el bulón del pistón. Se realizan los mismos pasos que en el cigüeñal para crear los marcadores. En la Tabla 5.5 pueden verse las coordenadas que tienen los dos marcadores.

Marcador	Coordenada X [mm]	Coordenada Y [mm]	Coordenada Z [mm]
Cigüeñal	0	0	-75
Pistón	0	0	75

Tabla 5.5 Coordenadas de los marcadores de las bielas

En la Figura 5.10 puede verse la biela con sus dos marcadores creados y con el BRF, que es el marcador que viene por defecto, que es el sistema de coordenadas local de cada cuerpo.

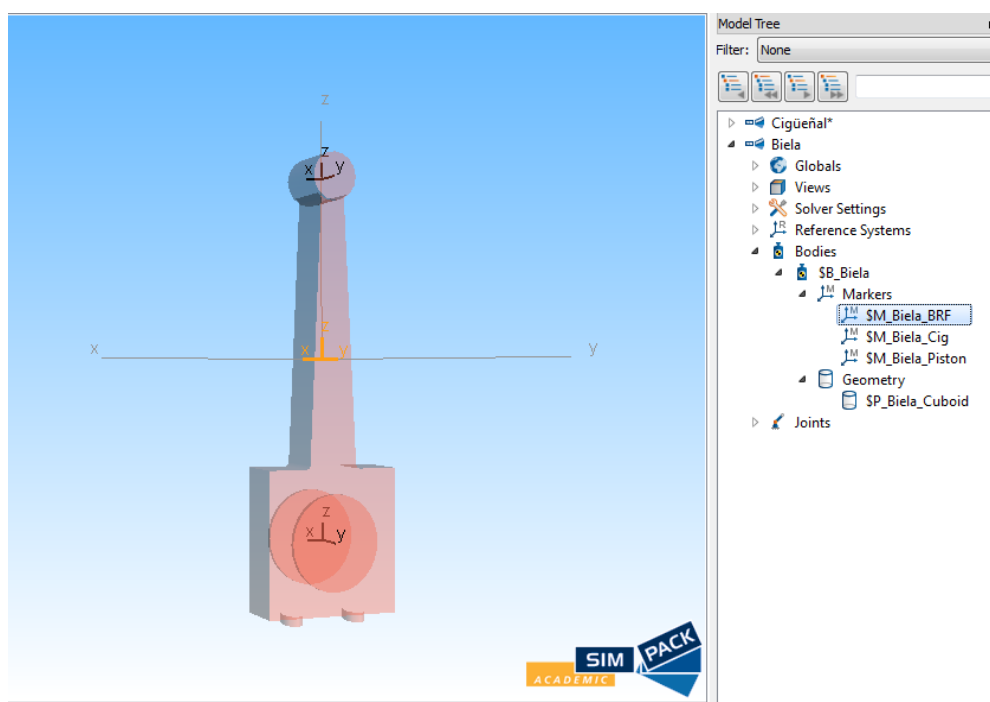


Figura 5.10 Biela con sus marcadores (Simpack)

5.2.3 Pistones

El pistón se realiza de manera conjunta con el bulón. El cuerpo principal es el pistón, y el bulón es una primitiva asociada al cuerpo principal. Primero se crea el pistón y posteriormente se asocia el bulón a él.

Para crear el pistón lo que se hace es usar las expresiones que se obtienen de [2]. Estas expresiones son, por un lado:

$$S = 2l$$

Donde S es la carrera que realiza el pistón dentro del cilindro, y como se ha comentado al realizar la biela, l es la longitud del radio del círculo según el cual las muñequillas giran en torno al eje principal del cigüeñal.

Por otro lado también se tiene que dependiendo de la relación en la carrera y el diámetro del cilindro (D), el motor es:

- $\frac{S}{D} < 1$ para motores supercuadrados. Este tipo de motores tienen un par bajo, pero pueden girar muy rápido. Se usan motores así en vehículos de competición.
- $\frac{S}{D} = 1$ para motores cuadrados. Este tipo se usa para cuando no se necesita un par muy alto. Los vehículos convencionales llevan estos motores.
- $\frac{S}{D} > 1$ para motores alargados. Estos motores se usan cuando se necesita mucho par. Un ejemplo son los motores de camiones o de maquinaria pesada.

El motor que se va a diseñar en este proyecto es un motor convencional que puede ir instalado por ejemplo, en cualquier automóvil de calle. Es por ello que se tiene un motor cuadrado, con una relación de $\frac{S}{D} = 1$. Esto quiere decir que la carrera del pistón dentro del cilindro es igual al diámetro de nuestro cilindro $S = D$.

Se puede obtener de la primera expresión, que el valor del diámetro del cilindro y del pistón es:

$$S = D = 2l = 2 \cdot 42.5 = 85 \text{ mm}$$

Teniendo el valor del cilindro se puede obtener el del pistón que va por él. No es exactamente el mismo ya que, a pesar de que este motor no va a llegar a ser construido, hay que dejar una holgura debido a que el montaje se realiza en frío, y

después cuando el motor está en funcionamiento los elementos se calientan y se dilatan obteniendo un ajuste adecuado entre ellos. Es por ello que se deja una holgura de 1 mm a cada lado, teniendo un diámetro final de pistón de 83 mm.

A partir de este valor de referencia, y usando la guía de Simpack [27] donde se ve a que corresponde cada parámetro como se puede ver en la Figura 5.11, se introducen el resto de los valores para obtener una geometría adecuada de pistón. Los valores finales son los que se pueden ver en la Figura 5.12.

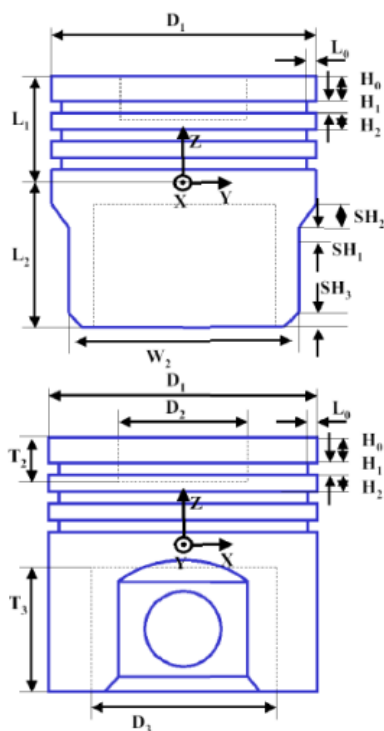


Figura 5.11 Parámetros del pistón de la guía de Simpack [27]

3: L1 Piston upper length:	0.02	
4: D1 Piston upper diameter:	0.083	
5: L2 Piston lower length:	0.04	
6: W2 Piston lower width:	0.06	
7: N Number of pistonrings:	3	
8: L0 Pistonring depth:	0.006	
9: H0 Pistonring upper distance:	0.005	
10: H1 Pistonring distance:	0.002	
11: H2 Pistonring height:	0.0016	
12: SH1 Upper side phase height 1:	0.024	
13: SH2 Upper side phase height 2:	0.004	
14: SH3 Lower side phase height:	0.004	
15: AL5 Lower side phase angle:	0.61	
16: D2 Upper hole diameter:	0.035	
17: T2 Upper hole depth:	0.012	
18: D3 Lower hole diameter:	0.045	
19: T3 Lower hole depth:	0.045	

Figura 5.12 Valores de los parámetros del pistón

Lo siguiente que se va a hacer es añadir el bulón al pistón, para ello se crea una nueva geometría como se hizo en el cigüeñal. En la Tabla 5.6 se pueden ver las coordenadas que tiene el bulón respecto del pistón. Por último también se le cambia el color para que se pueda apreciar. En la Figura 5.13 puede verse el bulón alojado dentro del pistón.

Elemento	Coordenada X [mm]	Coordenada Y [mm]	Coordenada [mm]
Bulón	0	0	-20

Tabla 5.6 Coordenadas del bulón

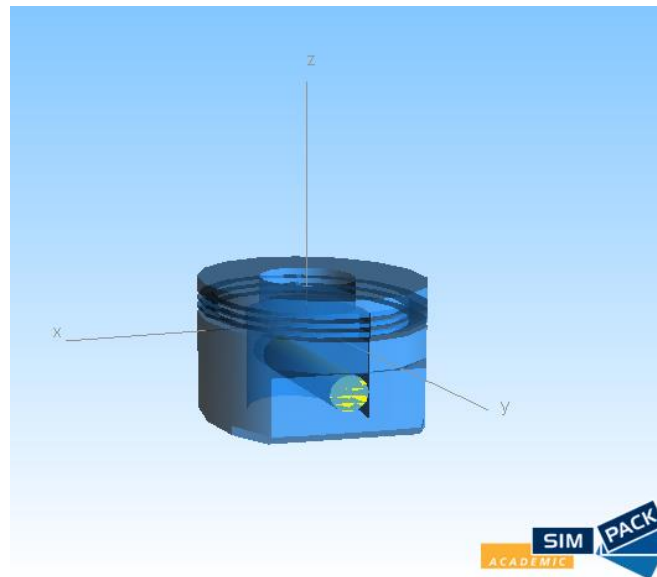


Figura 5.13 Bulón dentro del pistón (Simpack)

Por último se añaden los marcadores necesarios para realizar la conexión del pistón con la biela, que se realiza por medio del bulón. El marcador por tanto va a estar en el eje del bulón, y tiene unas coordenadas que pueden verse en la Tabla 5.7.

Marcador	Coordenada X [mm]	Coordenada Y [mm]	Coordenada Z [mm]
Biela	0	0	-20

Tabla 5.7 Coordenadas del marcador del bulón

En la Figura 5.14 puede distinguirse el bulón dentro del pistón y también el marcador que contiene junto con el marcador de coordenadas locales del pistón.

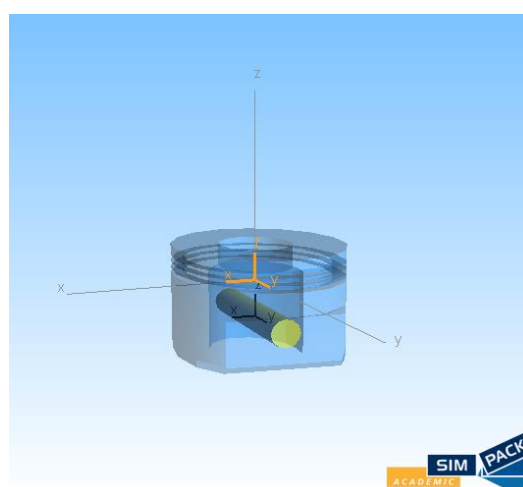


Figura 5.14 Marcador del bulón (Simpack)

5.2.4 Bloque

Para la creación del bloque motor, se tienen que tener en cuenta las dimensiones que tiene el conjunto (cigüeñal, bielas, pistones y cilindros). Se hace un cálculo de la altura, el ancho y el largo en las zonas máximas del conjunto para poder dimensionar el bloque motor.

Para dimensionar la altura del conjunto se hace un cálculo en el momento en el que se tenga el pistón en el punto muerto superior del cilindro. Se tiene en cuenta la altura del cigüeñal restándole el radio de la zona donde se tiene la muñequilla. De la biela se toma la longitud entre los centros de los agujeros de la cabeza y el pie de la misma, del pistón se suma la longitud desde el centro del bulón hasta la parte superior del elemento y finalmente se deja un espacio de 5 mm de longitud para el volumen de la cámara de combustión. Para el ancho se tiene en cuenta el diámetro exterior de los cilindros en la parte superior del bloque y el ancho del cigüeñal para la parte inferior. En cuanto al largo simplemente se trata de la longitud que tiene el cigüeñal. Las dimensiones del conjunto calculadas se pueden ver en la Tabla 5.8.

Dimensión	Valor [mm]
Altura	307.5
Ancho superior	85
Ancho inferior	120
Largo	440

Tabla 5.8 Dimensiones mínimas del bloque

Sabiendo que las dimensiones del bloque no pueden ser inferiores a las de la Tabla 5.8 y haciendo uso de la información de los parámetros del bloque de la guía que aporta Simpack [27] (Figura 5.15), se dimensiona el bloque con unos valores apropiados. Estos valores pueden verse en la Figura 5.16.

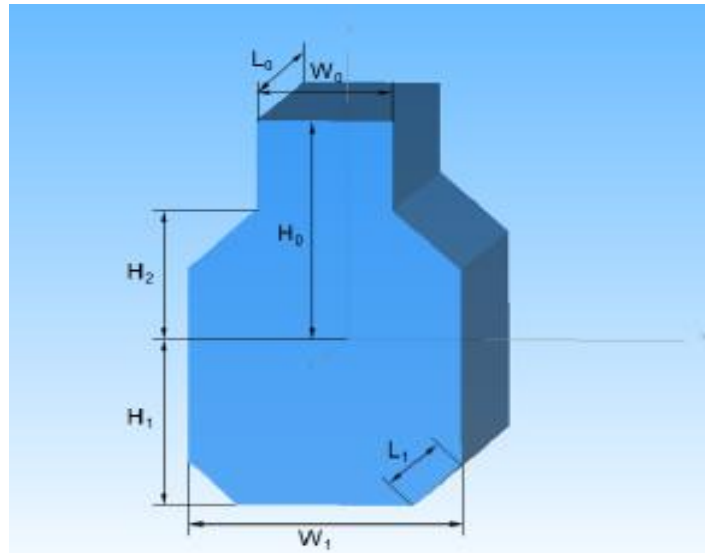


Figura 5.15 Parámetros de la guía de Simpack para el bloque motor [27]

1: Type:	In-line	P
4: H0 Cylinder head distance:	0.16	▲▼
5: W0 Cylinder head width:	0.095	▲▼
6: L0 Engine block depth:	0.45	▲▼
7: W1 Engine block width:	0.14	▲▼
8: H1 Engine block lower height:	0.16	▲▼
9: H2 Engine block upper height:	0.08	▲▼
10: L1 Phase length:	0.02	▲▼

Figura 5.16 Valores para los parámetros del bloque

Se obtiene la geometría final de bloque motor que puede verse en la Figura 5.17. A este elemento se le aplica un color gris claro para que no resalte tanto. También se le aplica un porcentaje de transparencia para que puedan verse el resto de los elementos una vez esté el ensamblaje realizado.

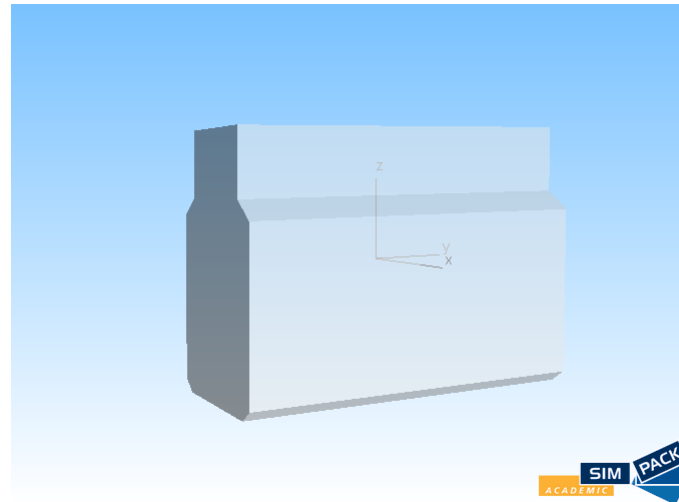


Figura 5.17 Geometría final del bloque motor (Simpack)

Por último se añade un marcador al bloque motor para que se realice la conexión con el cigüeñal. Las coordenadas del marcador son las indicadas en la Tabla 5.9 y en la Figura 5.18 puede verse el marcador.

Marcador	Coordenada X [mm]	Coordenada Y [mm]	Coordenada Z [mm]
Cigüeñal	0	-225	-92.5

Tabla 5.9 Coordenadas del marcador del bloque

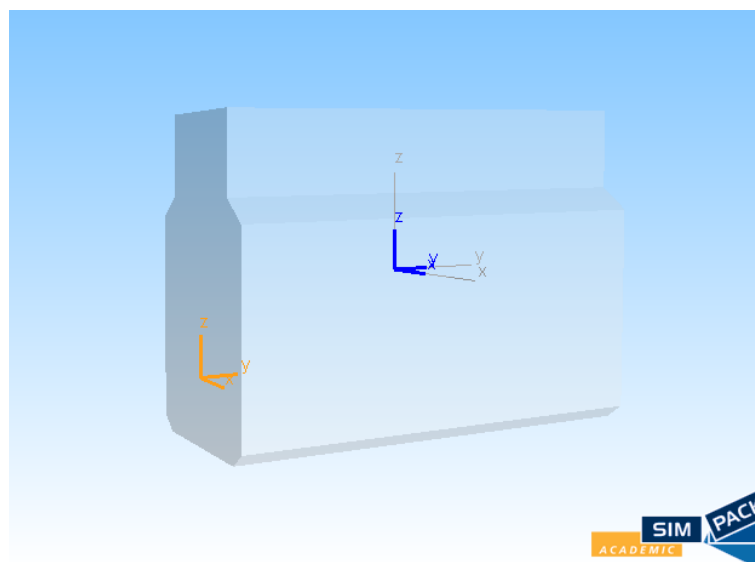


Figura 5.18 Bloque motor con el marcador creado (Simpack)

5.2.5 Ensamblaje del motor

5.2.5.1 Ensamblaje de las bielas

Una vez se tienen los marcadores en el cigüeñal, lo que se hace es ir acoplando los elementos correspondientes. Lo primero que se tiene que hacer es introducir los archivos de los elementos que se van a ensamblar. Para ello se introduce en *Search Path* la carpeta en la que están dichos elementos.

Para que aparezca un elemento se tiene que crear una subestructura en el cigüeñal y al hacerlo seleccionar el cuerpo que se quiere introducir, en este primer caso se introduce la biela como puede verse en la Figura 5.19.

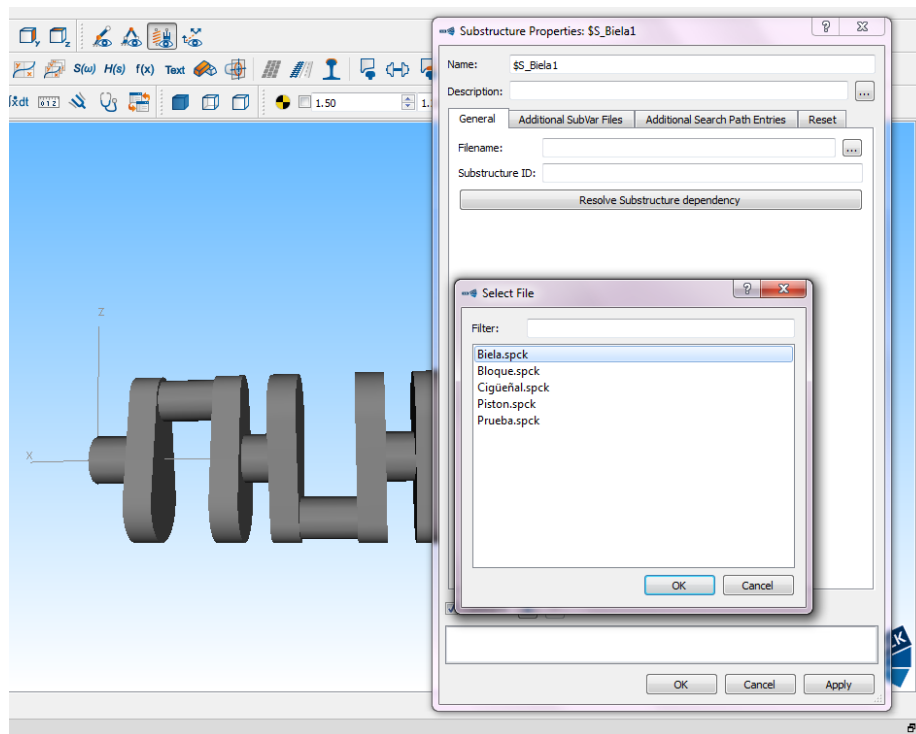


Figura 5.19 Creación de la subestructura de la primera biela (Simpack)

Una vez hecho esto se tiene que realizar la unión entre los elementos. Se hace uso de los marcadores para lograrlo. Dentro de la subestructura de la biela se va a *Joint* y se seleccionan los marcadores que realizan la unión junto con el movimiento que permite la unión y si es una unión dependiente o independiente. En la zona de *From Maker* se selecciona en todos los contactos que se realice el marcador de la pieza que ya está en el ensamblaje, en este caso el cigüeñal. En la zona de *To Maker* se selecciona el marcador del elemento que se acaba de añadir al ensamblaje, en este

primer caso, la primera biela. Hay que ir colocando de manera correcta las uniones ya que se han creado muchos marcadores y cada uno de ellos tiene únicamente una pareja de marcadores para realizar la unión.

También se tiene que especificar el tipo de movimiento que permite la unión. En este caso, como en la mayoría de las uniones que se realizan, es de rotación en el eje correspondiente, que en este caso es el eje y, por lo que se selecciona como movimiento permitido la rotación en beta. Por último se especifica que la unión es dependiente ya que el movimiento es dependiente del que tenga el cigüeñal.

Todas las opciones seleccionadas en la unión que se ha realizado pueden verse en la Figura 5.20 junto con la unión finalizada de la primera de las bielas con el cigüeñal.

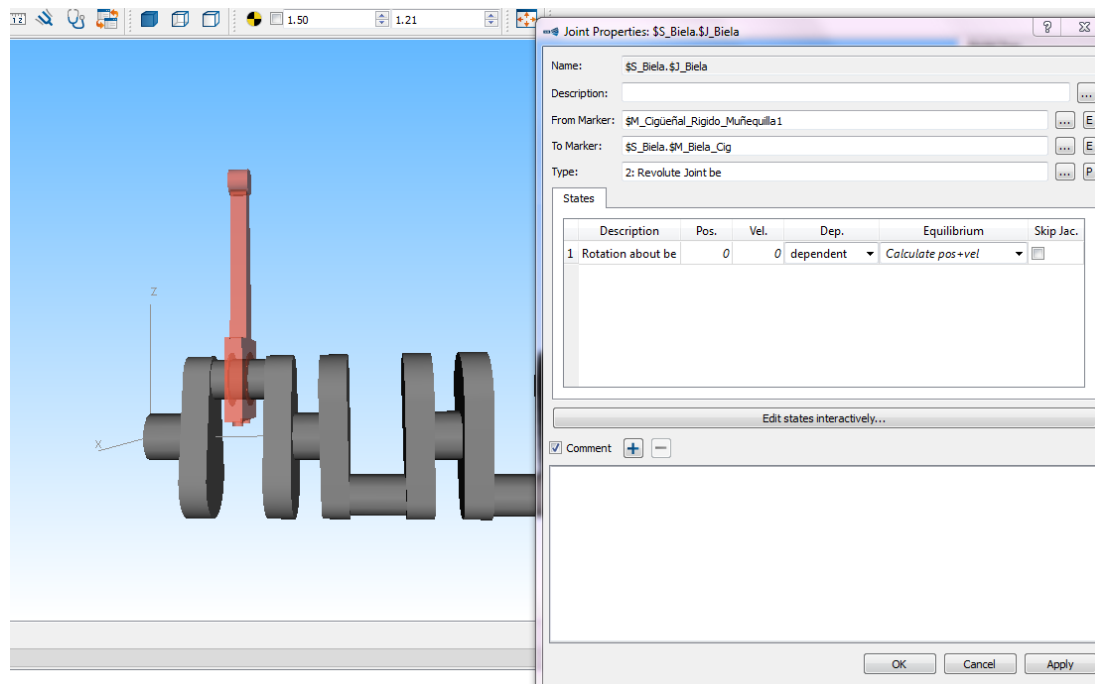


Figura 5.20 Opciones de la unión junto con la propia unión realizada (Simpack)

El resto de las bielas son unidas al cigüeñal de la misma manera que se ha hecho con la primera de ellas. Cada marcador unido a su correspondiente marcador, seleccionando la rotación en beta y señalando que se trata de una unión dependiente. En la Figura 5.21 puede verse la unión de todas las bielas en el cigüeñal.

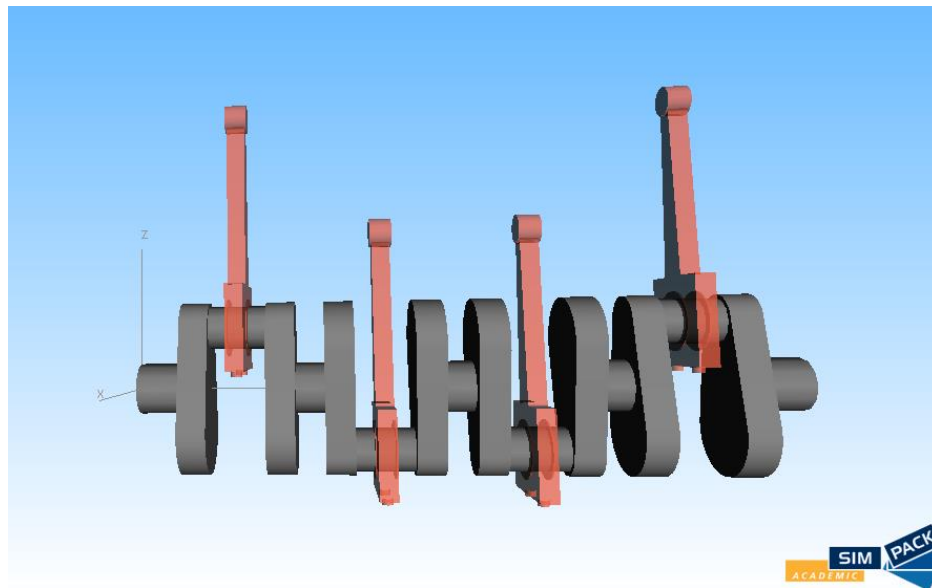


Figura 5.21 Unión de todas las bielas al cigüeñal (Simpack)

5.2.5.2 Ensamblaje de los pistones

En el ensamblaje de los pistones estos irán unidos a las bielas por medio de los bulones que se han instalado en cada pistón, y los marcadores seleccionados en la opción de *From Maker* son aquellos que están ubicados en el agujero del pie de cada una de las bielas correspondientes. El resto del proceso se realiza igual que en la unión de las bielas al cigüeñal por lo que no se explicado de nuevo. Directamente se puede ver en la Figura 5.22 todos los pistones unidos a las bielas y el cigüeñal.

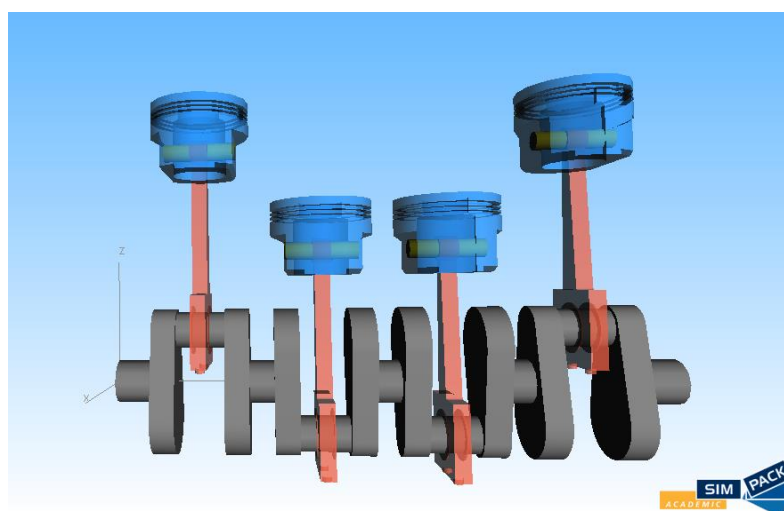


Figura 5.22 Unión de los pistones a las bielas (Simpack)

En este apartado se especifican también las restricciones de los pistones, que hacen de cilindros. Para ello se necesitan marcadores fijos en el cigüeñal que definan el movimiento vertical que tienen los pistones. Estos marcadores no son iguales a los creados en los cuerpos. Los creados anteriormente se mueven solidarios a los cuerpos en los que están. Los que se crean ahora son marcadores fijos dentro de un cuerpo y no se mueven. Para crearlos se va a *Cigüeñal_Rigido > Reference Systems > \$R_Isys > Markers*. En la Tabla 5.10 pueden verse las coordenadas que tienen cada uno de los marcadores.

Marcador	Coordenada X [mm]	Coordenada Y [mm]	Coordenada Z [mm]
Cilindro 1	0	7	0
Cilindro 2	0	17	0
Cilindro 3	0	27	0
Cilindro 4	0	37	0

Tabla 5.10 Coordenadas de los marcadores fijos

Lo siguiente que se hace es crear las geometrías de referencia que hacen de cilindros y que no actúan como cuerpos. Para ello se va a *Cigüeñal_Rigido > Reference Systems > \$R_Isys > Geometry*. Los parámetros de los cilindros pueden verse en la Tabla 5.11 y las coordenadas que tiene cada uno de los cilindros en la Tabla 5.12. En los valores de esta última tabla se ha tenido en cuenta la altura máxima que tienen que tener los cilindros.

Geometría	Diámetro interior [mm]	Diámetro exterior [mm]	Longitud [mm]
Cilindro	85	90	180

Tabla 5.11 Dimensiones de los cilindros

Geometría	Coordenada X [mm]	Coordenada Y [mm]	Coordenada Z [mm]
Cilindro 1	0	70	0
Cilindro 2	0	170	0
Cilindro 3	0	270	0
Cilindro 4	0	370	0

Tabla 5.12 Coordenadas de los cilindros

En la Figura 5.23 puede verse tanto los marcadores fijos creados como las geometrías de referencia.

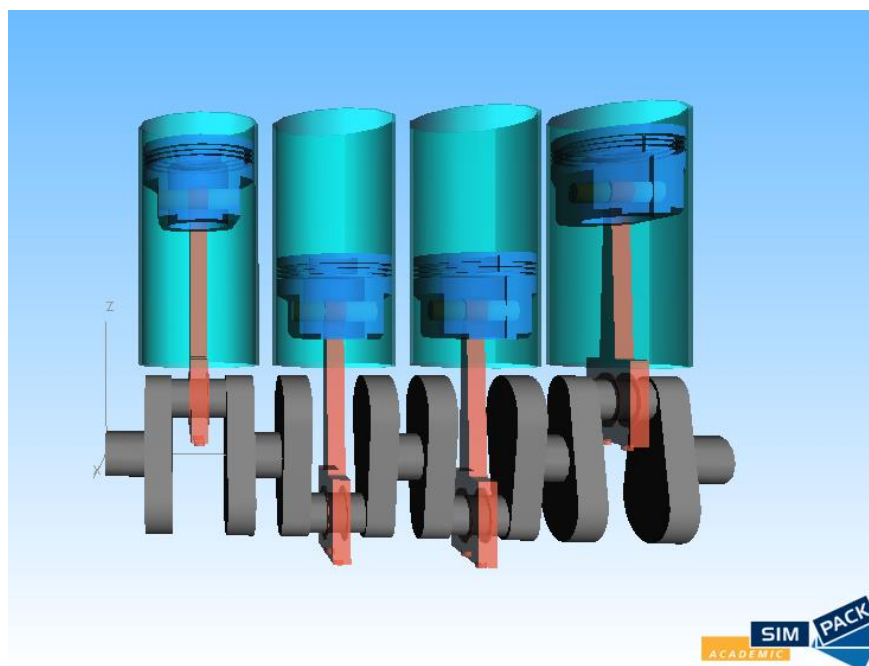


Figura 5.23 Cilindros y marcadores fijos (Simpack)

Por último se tiene que hacer las *Constrains* que son las restricciones de movimiento vertical que tiene cada uno de los pistones. Para crearlas se selecciona *Create Constraint* en la barra de herramientas. Se introducen aquí las restricciones de movimiento. En el cigüeñal se tiene un movimiento de rotación en el eje y, por lo que cada uno de los cilindros debe restringir la traslación en el eje x, y la rotación en el eje y.

5.2.5.3 Ensamblaje del bloque motor

Por último se realiza la unión del bloque motor al resto de la estructura. Siguiendo los pasos de las uniones anteriores se une el único marcador creado en el bloque con el que se ha creado en el extremo del eje del cigüeñal. La unión completa de todos los elementos del motor puede verse en la Figura 5.24.

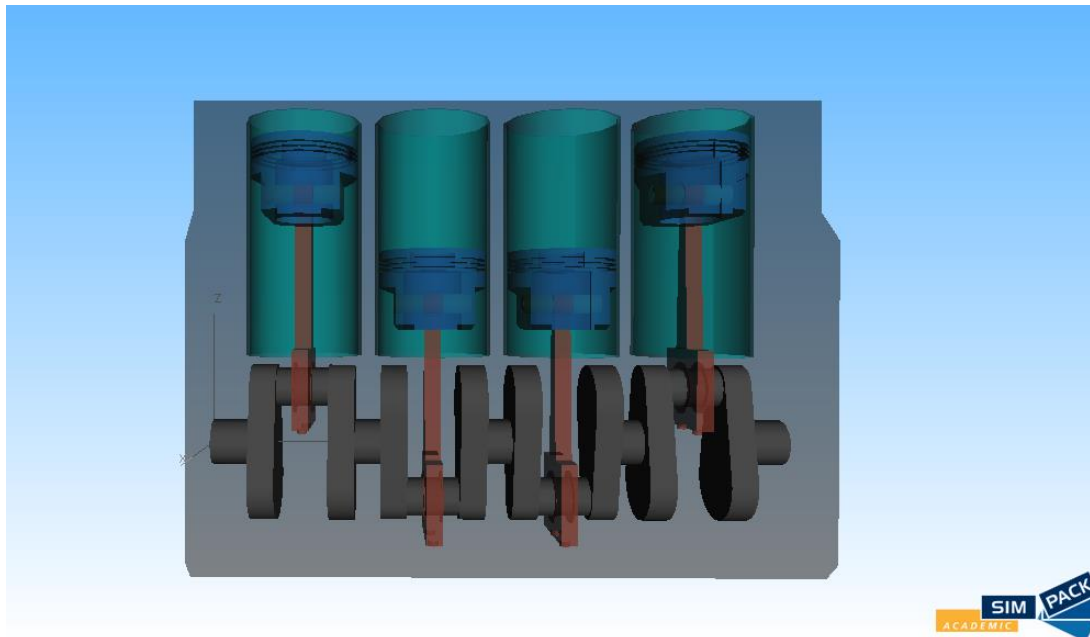


Figura 5.24 Ensamblaje final del motor (Simpack)

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS MODAL

6.1 Análisis modal en Ansys

6.1.1 Introducción

El análisis modal en Ansys es realizado en el módulo de Ansys APDL. La versión que se usa es la de ANSYS Mechanical APDL 14.0. Para ello es necesario importar la geometría creada en Solid Edge. Al hacer esta operación hay que realizar un proceso previo de modificación del código del archivo de la geometría, que es explicado más adelante. Una vez hecho esto se malla la geometría con una serie de operaciones para que se pueda exportar el mallado a Simpack. Una vez se tenga hecho el mallado, se realiza el análisis modal en Ansys.

6.1.2 Importación de la geometría

Para realizar esta importación de una manera correcta, aparte de guardar la geometría en formato “.iges” y en milímetros en vez de pulgadas como se detalló en el anterior capítulo, se tiene que efectuar una operación antes de abrir la geometría en Ansys.

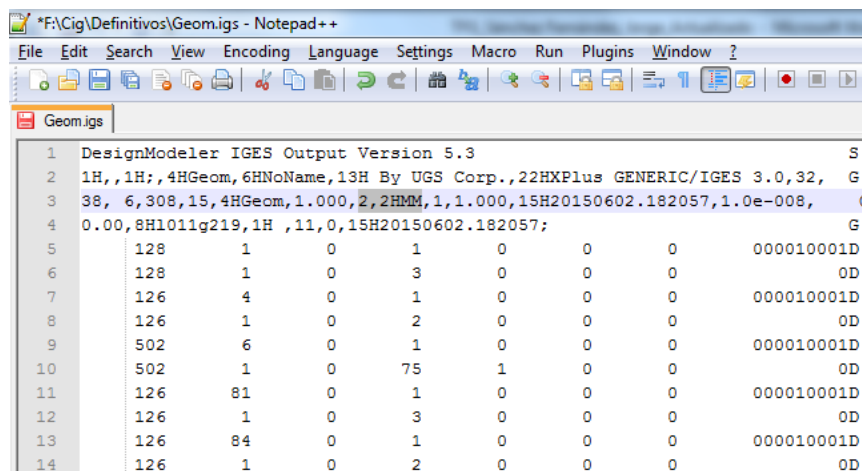
Cuando se guarda la geometría en Solid Edge, esta se guarda en milímetros. Ansys no trabaja con unidades, pero Simpack trabaja en metros, por lo que si se abre en él un modelo que tiene milímetros como unidad, el programa leerá los valores como si fueran metros. Es por esto que se necesita hacer una modificación en el código del archivo “.iges” para indicar que la geometría está expresada en metros.

Para realizar la modificación en el código, lo que se tiene que hacer es abrir el archivo “.iges” con el editor de texto Notepad ++. Al hacerlo, aparece el código del archivo y se pueden realizar los cambios necesarios. Como se indica en [28], para realizar el cambio de unidades de milímetros a metros solo hay que hacer un pequeño cambio en el código. En la Figura 6.1 se puede ver los diferentes comandos que hay para tener distintas unidades.

unit	indicator 1	indicator 2
> inches	> 1	> 2HIN or 4HINCH
> millimeters	> 2	> 2HMM
> feet	> 4	> 2HFT
> miles	> 5	> 2HMI
> meters	> 6	> 1HM
> kilometers	> 7	> 2HKM
> mils	> 8	> 3HMIL
> microns	> 9	> 2HUM
> centimeters	> 10	> 2HCM
> microinches	> 11	> 3HUIN

Figura 6.1 Comandos para el cambio de unidades [28]

Cuando se tiene el código abierto en Notepad ++, se puede ver en la segunda fila que se tiene los siguientes comandos “2, 2HMM”. Para poder tener la geometría en metros, que es lo que se necesita, se cambian esos comandos por “6, 1HM”. Se puede ver el cambio en las figuras: Figura 6.2 y Figura 6.3.



```

1 DesignModeler IGES Output Version 5.3 S
2 1H,,1H;,4HGeom,6HNoName,13H By UGS Corp.,22HXPlus GENERIC/IGES 3.0,32, G
3 38, 6,308,15,4HGeom,1.000,2,2HMM,1,1.000,15H20150602.182057,1.0e-008, G
4 0.00,8H1011g219,1H ,11,0,15H20150602.182057; G
5 128 1 0 1 0 0 0 000010001D
6 128 1 0 3 0 0 0 0D
7 126 4 0 1 0 0 0 000010001D
8 126 1 0 2 0 0 0 0D
9 502 6 0 1 0 0 0 000010001D
10 502 1 0 75 1 0 0 0D
11 126 81 0 1 0 0 0 000010001D
12 126 1 0 3 0 0 0 0D
13 126 84 0 1 0 0 0 000010001D
14 126 1 0 2 0 0 0 0D

```

Figura 6.2 Archivo ".iges" sin modificar

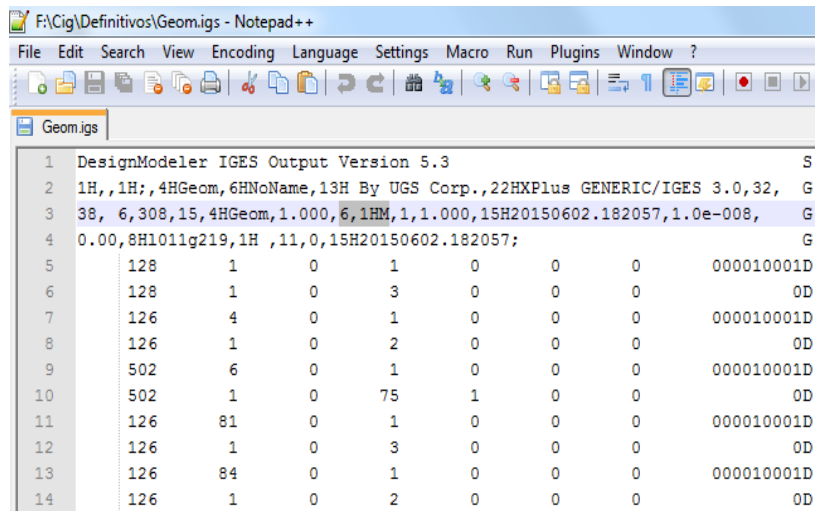


Figura 6.3 Archivo ".iges" modificado

Una vez se haya hecho esto, se guardan los cambios y ya se podrá abrir el archivo en Ansys APDL, como puede verse en la Figura 6.4 para realizar el mallado de la geometría.

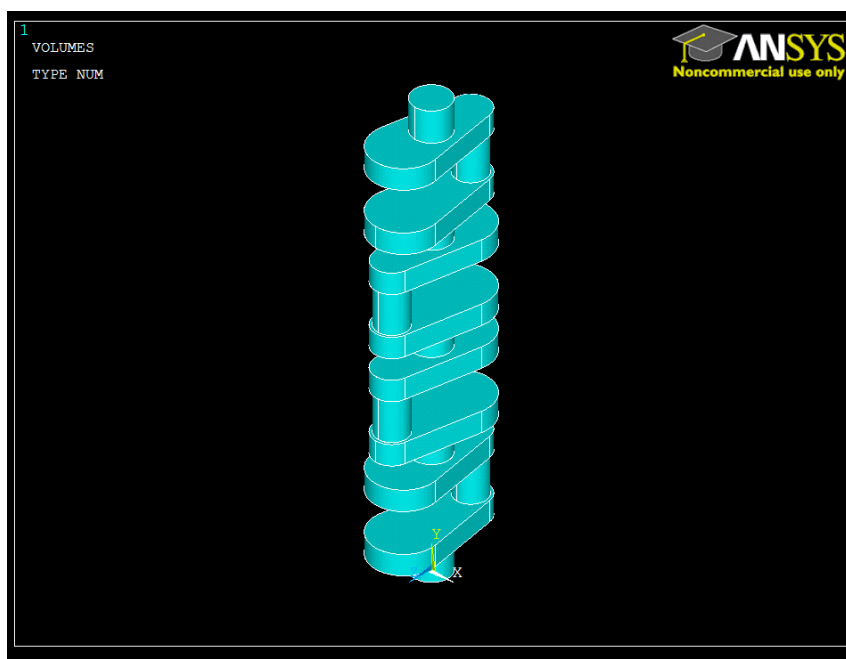


Figura 6.4 Cigüeñal importado (Ansys)

6.1.3 Mallado

El mallado del cigüeñal se va haciendo siguiendo unos pasos. Ansys APDL va guiando el proceso con las etapas que tiene en la parte de Preprocessor y que pueden verse en la Figura 6.5. Por tanto, lo primero que se hace es crear los tipos de elementos en Element Type, luego las constantes reales en Real Constant, después se crean el material con el que se trabaja en Material Props, en Modeling se hacen algunas operaciones de división del volumen para un correcto mallado que es explicado más adelante, se crea la malla en Meshing y por último hay que volver a la etapa de Modeling para crear los pares de contacto necesarios.

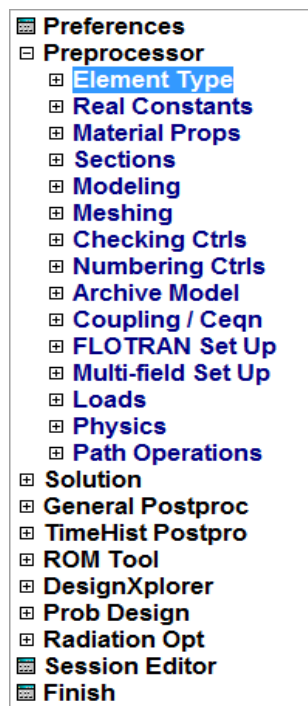


Figura 6.5 Lista de etapas (Ansys)

6.1.3.1 Element Type

En este primer paso, lo que se hace es crear los tipos de elemento de los que va a estar compuesta la malla que se genera más tarde. Dentro de una malla se puede tener uno o más tipos de elemento. En este caso, se tienen cuatro tipos de elemento diferentes, aunque en este punto solo son añadidos dos a la lista. Los otros dos se generan de manera automática cuando se realiza el par de contacto.

Puesto que el volumen que se tiene es sólido, se elige un elemento tipo SOLID en vez de un PLANAR. El elemento tipo SOLID que se usa es el SOLID185. El otro elemento que se añade en este punto es el de tipo masa, y que es usado también en el par de contacto que se crea más adelante. Este elemento se llama MASS21. En la Figura 6.6 se puede ver la lista de elementos que se han añadido.

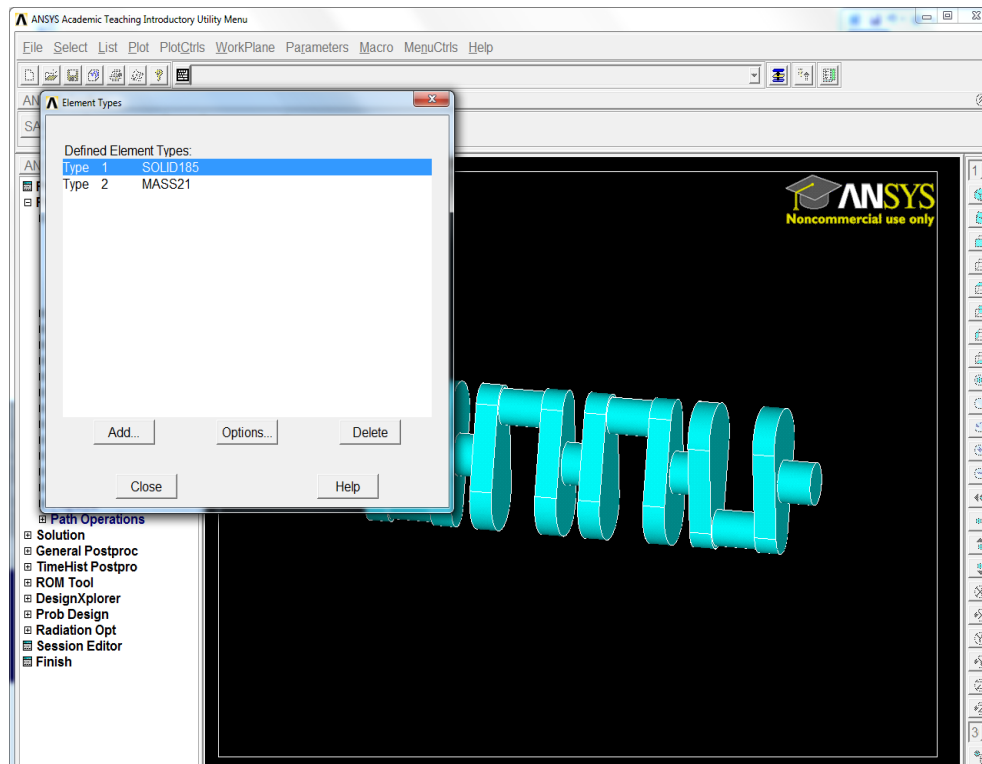


Figura 6.6 Lista de elementos añadidos (Ansys)

Las propiedades de todos los tipos de elemento que serán usados en la malla se pueden ver en la Tabla 6.1, incluidos los elementos de contacto que aún no han sido añadidos a la lista [29].

Tipo de elemento	Características
SOLID185	Elemento tridimensional, usado en estructuras sólidas. Está definido por 8 nodos. Tiene 3 grados de libertad, la traslación en x, y, z.
MASS21	Es un elemento de tipo puntual, con 6 grados de libertad, la traslación en x, y, z, y la rotación en x, y, z. Se le puede asignar una masa diferente a cada dirección.
CONTA174	Este elemento se usa para representar contactos y deslizamientos en 3-D entre una superficie objetivo (que será el elemento tipo TARGE170), y una superficie deformable, definida por este elemento. Tiene 3 grados de libertad, las traslaciones en x, y, z.
TARGE170	Este elemento es usado para representar contactos, en estudios de 3-D, siendo la superficie objetivo de dicho contacto. Se puede imponer cualquier tipo de desplazamiento o rotación.

Tabla 6.1 Propiedades de los elementos

A la hora de añadir el elemento SOLID185, hay que asignarle la opción de “Reduced Integration” para poder crearle una constante real (el paso siguiente), sin tener que crear una sección específica para este elemento. Esto es crearle un factor de escala, pero dado que no se quiere escalar, el valor de dicha constante es 1.

6.1.3.2 Real Constant

Las constantes reales de un elemento son las propiedades que dependen del tipo de elemento. Estas pueden ser por ejemplo, las propiedades de sección transversal de un elemento de tipo viga. No todos los tipos de elemento requieren de constantes reales. Para este estudio, se crean constantes reales para los dos tipos de elemento que hasta ahora se tienen creados, el SOLID185 y el MASS21. Aunque pueda darse la situación de que no se introduzcan valores en las propiedades que se pueden modificar dentro de las constantes reales, este paso es necesario para tener un mallado correcto.

Para el tipo de elemento SOLID185, se crea la constante real número 1, y se asigna un factor de reducción de 1 ya que no se quiere tener reducción, como puede observarse en la Figura 6.7.

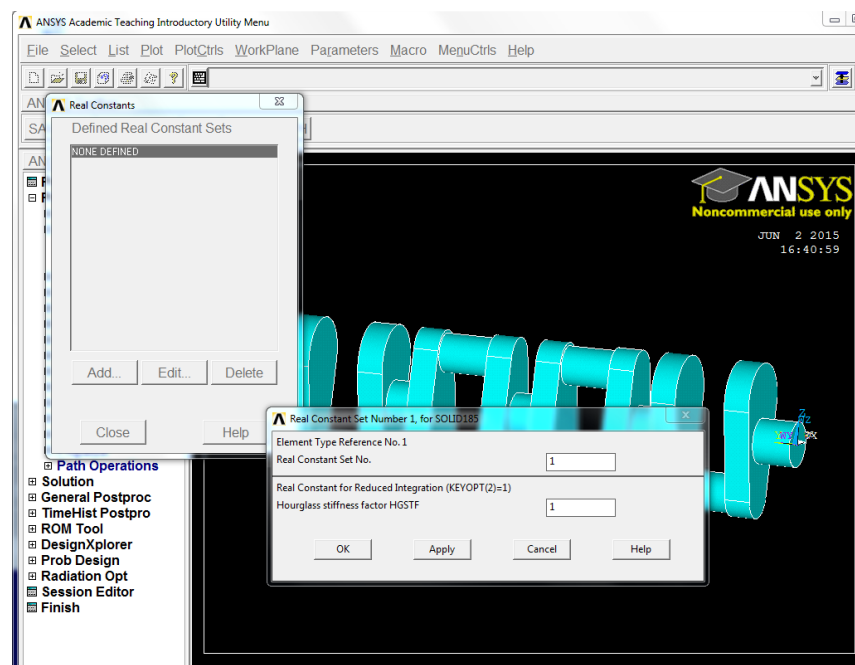


Figura 6.7 Constante real y factor de reducción del elemento SOLID185 (Ansys)

En el caso del elemento MASS21, la constante real creada es la número 2. Este elemento ha sido creado para el par de contacto que hay que realizar y va asignado a un punto independiente de la malla que se crea más adelante. Puesto que simplemente se trata de un punto para el par de contacto, la masa necesaria tiene que ser infinitesimal. Es por ello que se le asigna un valor de 10^{-6} en todos sus grados de libertad, en las traslaciones en x, y, z, y en las rotaciones en x, y, z. Pueden verse estos cambios en la Figura 6.8.

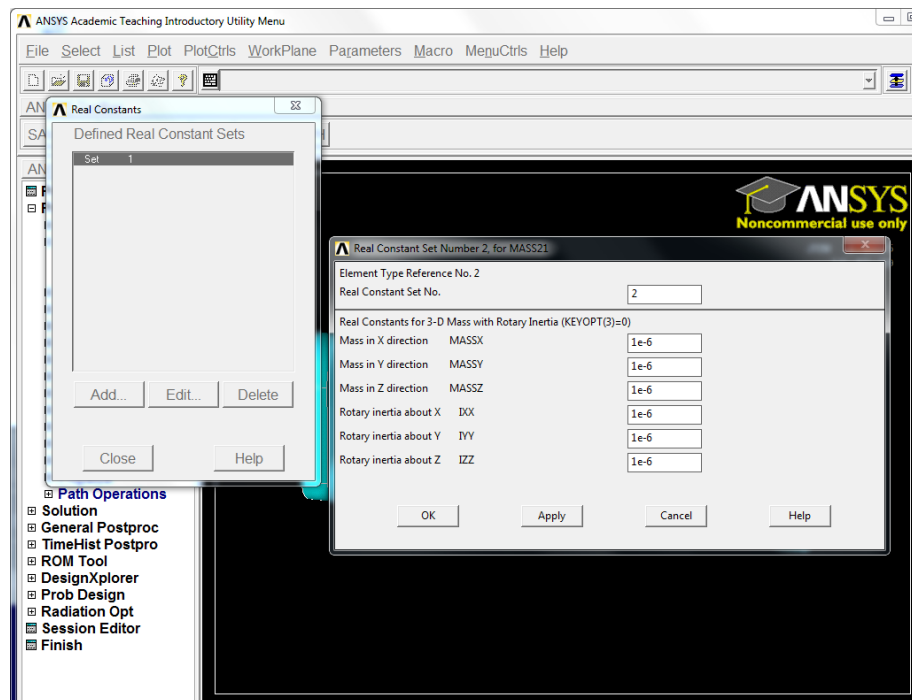


Figura 6.8 Valores asignados a la constante real del elemento MASS21 (Ansys)

6.1.3.3 Material Props

En este paso, se definen las propiedades del material con el que se va a realizar el estudio. El material con el que se trabaja es el acero, por lo que se crea un material de tipo estructural, lineal, elástico e isotrópico. La manera de definir el material es introduciendo los valores de módulo elástico, coeficiente de Poisson y densidad que tiene. Este procedimiento se puede ver en la Figura 6.9 y Figura 6.10.

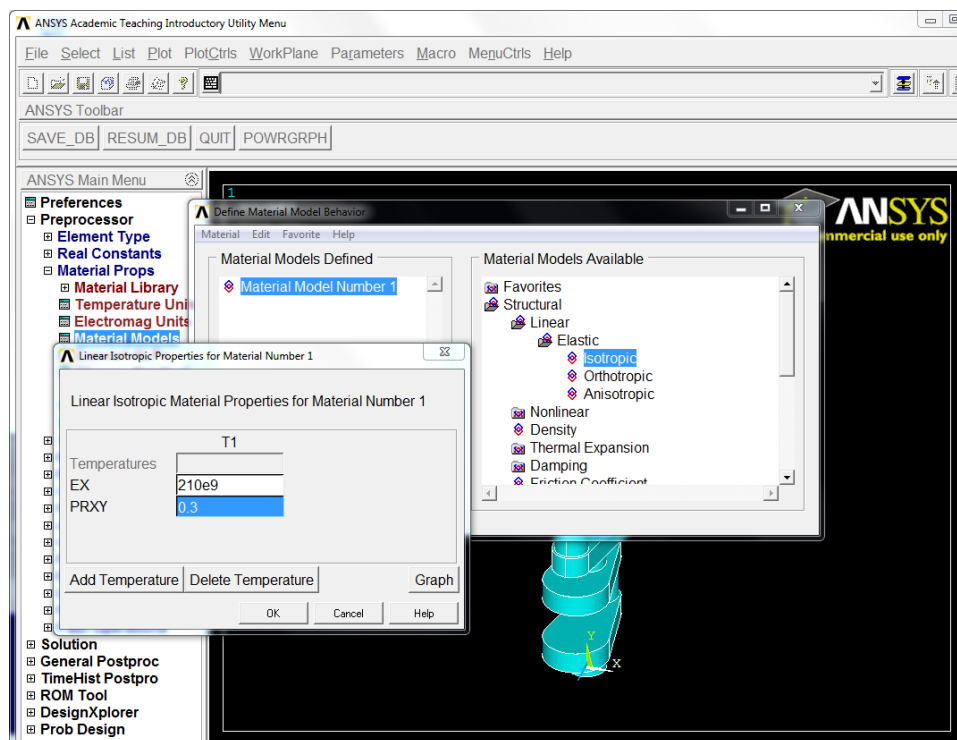


Figura 6.9 Definición de las propiedades del material I (Ansys)

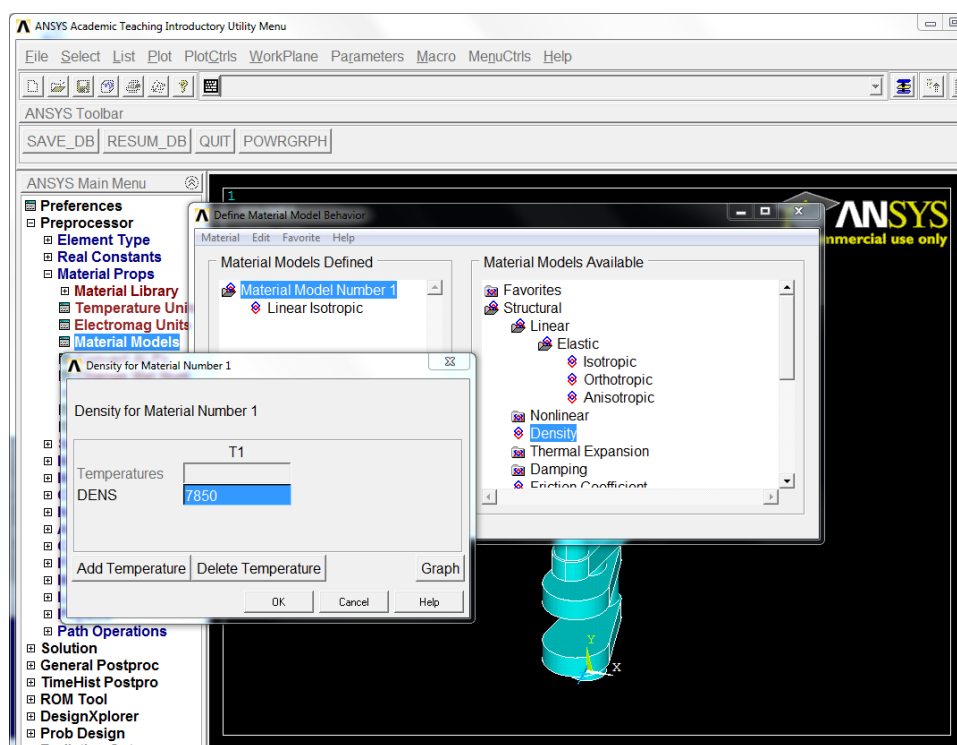


Figura 6.10 Definición de las propiedades del material II (Ansys)

Las propiedades que se han introducido para definir el material son tres de las propiedades más representativas. La definición de cada una de ellas es:

- **Modulo de elasticidad:** caracteriza el comportamiento de un material elástico en la dirección en la que se aplica la fuerza. Relaciona la tensión que se tiene con la deformación que se produce. Se suele medir en gigapascals (GPa).
- **Coeficiente de Poisson:** este coeficiente corresponde a la relación entre la elongación longitudinal y la deformación transversal en un ensayo de tracción. Es una propiedad adimensional.
- **Densidad:** es la masa que se tiene entre el volumen del sólido. Se mide en kilogramos por metro al cubo (kg/m^3).

En la Tabla 6.2 pueden verse los valores para cada una de estas propiedades del acero.

Propiedad	Valor numérico
Modulo elástico	210 GPa
Coeficiente de Poisson	0.3
Densidad	7850 kg/m^3

Tabla 6.2 Propiedades del acero

6.1.3.4 Modeling

En la parte de “*Modeling*”, primero se realizan dos operaciones, y después de la parte de “*Meshing*”, se vuelve a este módulo para realizar la última etapa. Las dos operaciones que se tienen que realizar ahora son la de crear los dos keypoint que en la etapa siguiente se convierten en nodos con elemento tipo TARGE170 del par de contacto, y la operación de dividir el volumen.

Se comienza creando los dos keypoint. Un keypoint es simplemente un punto que se puede colocar en cualquiera parte dentro del espacio de la geometría. Para crearlo se va a la parte de “*Create*” dentro del apartado “*Modeling*”. Los keypoint tienen que ir en los extremos del cigüeñal y son ubicados a 5 mm de cada extremo. A la hora de crearlos, lo que hay que introducir son las coordenadas que tienen y el número que se le asigna. En cuanto al número, puede ponerse por defecto, o se le puede asignar el que se desee. Se introducen las coordenadas y los números que van a ser asignados a cada keypoint. Se le pone un número característico a cada uno para

poder distinguirlo del resto de keypoint creados por defecto, a la hora de convertirlos en nodos y realizar el par de contacto.

Las características de los dos keypoint que se van a crear pueden verse en la Tabla 6.3.

Número	Coordenada x	Coordenada y	Coordenada z
100000	0	-0.005	0
200000	0	0.445	0

Tabla 6.3 Datos de los keypoint

Usando las coordenadas y el número asignado de la Tabla 6.3 se crean los keypoint, que pueden verse en la Figura 6.11.



Figura 6.11 Cigüeñal con los keypoint creados (Ansys)

Una vez se tienen los keypoint creados, se pasa a realizar la división del volumen. Esta operación se realiza debido a que se tiene una geometría compleja y es por ello que al mallar no deja realizar la operación con elementos hexaédricos. El programa utiliza elementos tetraédricos ya que haciendo uso de estos se puede mallar cualquier tipo de geometría por muy compleja que sea. El problema es que se necesitan elementos hexaédricos para poder realizar el par de contacto. Por esta razón es necesario dividir el volumen del cigüeñal y así poder mallar partes más simples con elementos hexaédricos.

Dividir el volumen consiste simplemente en que al hacerlo, el cigüeñal ya no está definido por un único volumen, si no por más de uno. Pero se sigue teniendo la misma geometría y en ningún caso, el cigüeñal está partido, ni sus componentes separados.

Puesto que los pares de contacto están ubicados en los extremos del eje del cigüeñal, lo que se necesita es que esos extremos del eje estén mallados de manera cuadrangular. Es por ello que la división del volumen se realiza en ambos extremos del eje. Al resto de la geometría se le aplica por defecto una malla con elementos tetraédricos debido a la complejidad que tiene.

Para conseguir dividir el volumen, lo primero que se tiene que hacer es crear nuevos planos de trabajo, denominados en Ansys como “WorkPlane”. Primero se hace la división en un extremo del eje principal del cigüeñal y después en el otro extremo. Para ello lo que se hace es crear el WorkPlane a partir de un keypoint que está definido ya dentro de la geometría. Al seleccionar el keypoint nos aparecerán los ejes de las direcciones principales del nuevo sistema de coordenadas de trabajo. Para poder hacer la división por un plano de este nuevo sistema de coordenadas, lo que se hace es girar los ejes, hasta que las direcciones x e y, definan el plano por donde se quiere dividir el volumen. Puede verse el proceso en la Figura 6.12, Figura 6.13 y Figura 6.14.

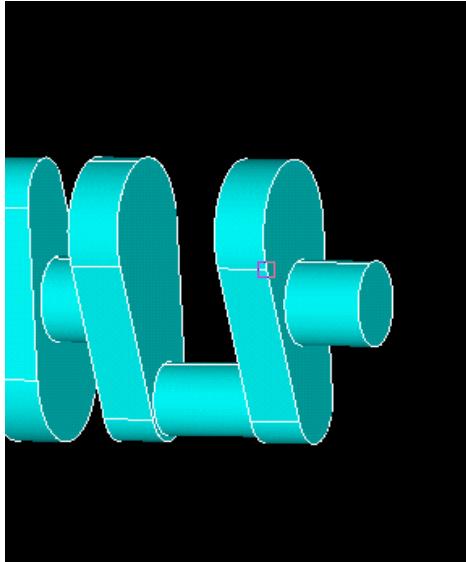


Figura 6.12 Keypoint del WorkPlane (Ansys)

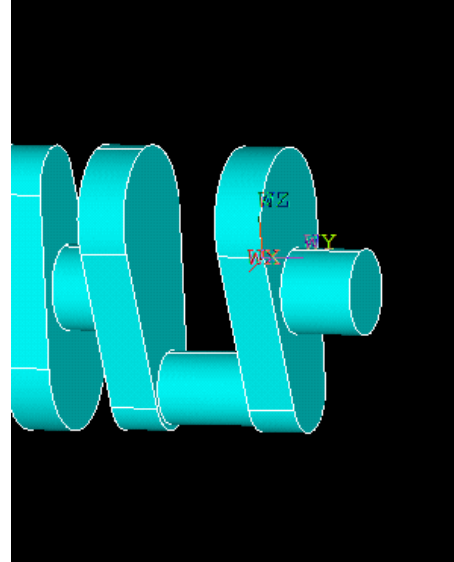


Figura 6.13 Ejes del WorkPlane (Ansys)

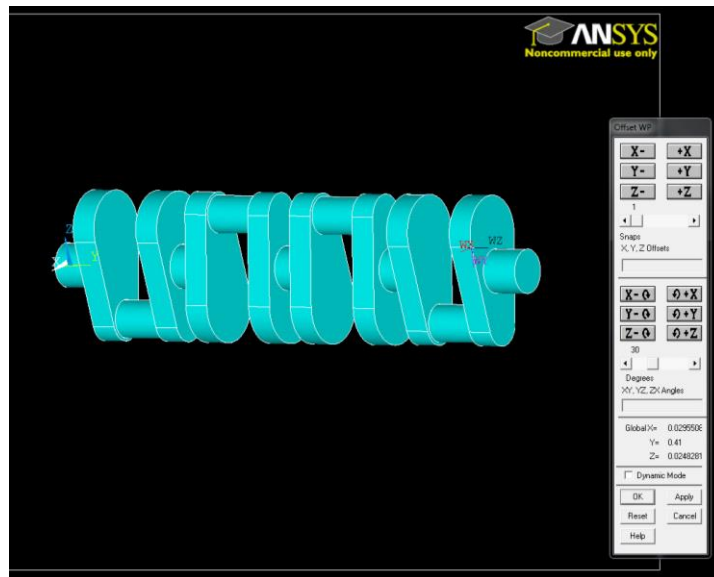


Figura 6.14 Ejes girados del WorkPlane (Ansys)

Una vez se tiene hecho el plano de división, se realiza la propia división. Para hacerlo, se va a *Modeling > Operate > Booleans > Divide > Volu By WrkPlane*. Una vez se ha efectuado, se tiene que escoger el volumen a dividir, se selecciona el cigüeñal, que se pone de color rosa, se le da a aceptar, y ya se tiene la división hecha. Lo siguiente que se tiene que hacer es la división en el otro extremo del cigüeñal. Siguiendo el mismo procedimiento se obtiene la segunda división. Como puede observarse en la Figura 6.15, al seleccionar el nuevo volumen que se quiere cortar ya no aparece el extremo del eje que se ha cortado en el proceso anterior.



Figura 6.15 Realización de la segunda división del volumen (Ansys)

6.1.3.5 Meshing

Una vez se tiene el volumen dividido, se realizará la parte más importante del proceso, el mallado de la geometría. Se tiene que mallar de manera independiente los tres volúmenes que se tienen. También se tiene que mallar los dos keypoint creados anteriormente.

Para realizar estas operaciones hay que ir a *Meshing > Meshing Tools*. Se asigna un tamaño para cada elemento y se selecciona mallar por volúmenes. El tamaño elegido para mallar es 0.01.

Se empieza a mallar los extremos del eje principal del cigüeñal. En ellos se quiere obtener una malla cuadrangular, por lo que se realiza un mallado por hexaedros. Primero se selecciona un extremo y después el otro. Puede verse en la Figura 6.16 el resultado.

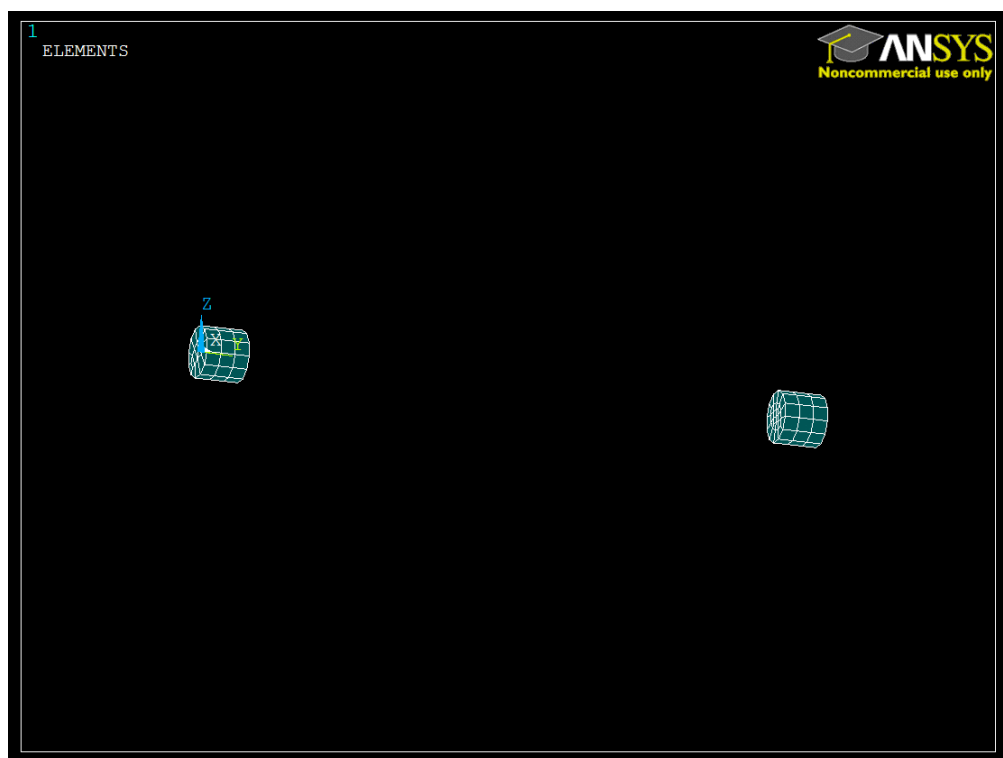


Figura 6.16 Mallado de los extremos del eje (Ansys)

Lo siguiente en ser mallado es el resto del cigüeñal. Para ello se realiza el mismo proceso, aplicando un mallado por hexaedros, nos daría error, ya que al ser una geometría complicada, no puede ser mallada mediante de esta manera. Es por ello que se selecciona que tenga elementos tetraédricos. Se selecciona el resto del volumen que queda por mallar y se obtiene el mallado de todo el volumen. Por último, queda mallar los dos keypoint que fueron creados para poder hacer el par de contacto. Se cambia simplemente mallar por keypoint en vez de mallar por volumen. Se introduce el número que se asignó a cada keypoint y ya están convertidos a nodos. En la Figura 6.17 se puede ver el mallado completo del cigüeñal.

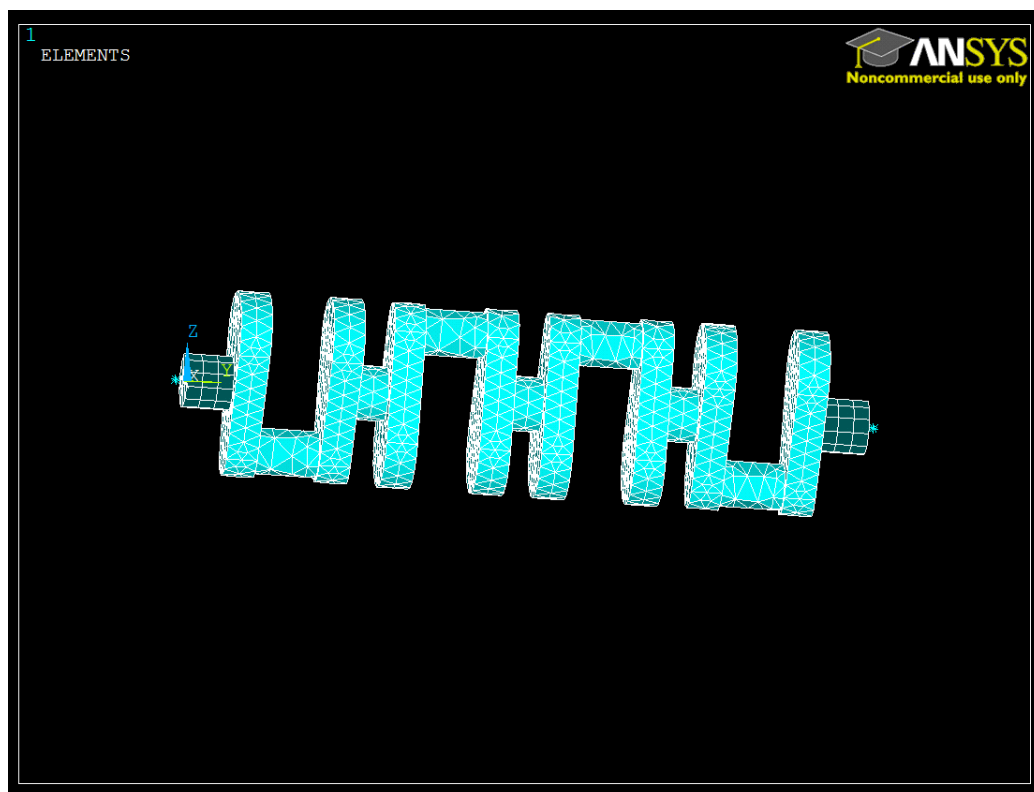


Figura 6.17 Mallado de todo el volumen (Ansys)

6.1.3.6 Modeling – Contact Pair

Por último, para acabar de mallar el cigüeñal se tiene que hacer el par de contacto. Cada par de contacto esta compuesto por dos tipos de elemento. Por una parte el elemento tipo CONTA174 que se asocia a los elementos que se tienen en el cigüeñal. Por otra el tipo TARGE170 y que viene asociado en este caso a cada uno de los keypoint que se han creado. Antes de comenzar con el proceso, hay que realizar algunos pasos previos. Lo primero que hay que hacer es anotar el número de los nodos

que se han generado a partir de los keypoint, ya que después este dato es necesario. Para ello se mira la lista de nodos, y están colocados en último lugar, ya que se han generado los últimos. Los números de los nodos de los keypoint se pueden ver en la Tabla 6.4.

Número de keypoint	Número de nodo
100000	2833
200000	2834

Tabla 6.4 Número de nodo asociado a cada keypoint

Lo siguiente que hay que hacer es mirar los elementos que van a formar el par de contacto, y sacar los nodos que los componen. Para ello lo que se hace es una selección de los nodos que forman los elementos de contacto. Al hacerlo se guardan en una lista, donde se pueden ver el número de todos ellos. Al hacer este proceso se obtienen los números de los nodos que forman cada contacto. Los nodos pertenecientes a cada contacto junto con sus coordenadas expresadas en milímetros pueden verse en la Tabla 6.5.

100000				200000			
Nodo	X	Y	Z	Nodo	X	Y	Z
1	4.4949	0.0000	3.6861	51	2.4384	4.4000	4.7524
2	1.2758	0.0000	-4.2451	52	-1.4117	4.4000	4.6750
4	10.7210	0.0000	1.6014	53	-5.6173	4.4000	3.3342
5	6.4348	0.0000	9.9676	54	-4.5533	4.4000	-0.9079
6	-3.1817	0.0000	6.5590	55	-2.7409	4.4000	-4.3146
8	-3.1515	0.0000	-8.8558	56	5.2777	4.4000	-3.0462
9	-9.8269	0.0000	-2.5291	57	4.3641	4.4000	8.0029
10	-7.0178	0.0000	2.3802	58	-6.3321	4.4000	8.4746
11	1.5982	0.0000	9.3097	59	-10.5430	4.4000	6.1084
12	9.1791	0.0000	6.0245	60	-8.4465	4.4000	-3.7188
13	7.3551	0.0000	-1.8490	61	-6.1065	4.4000	-8.4267
107	-17.5000	0.0000	0.0000	62	10.4240	4.4000	-6.0558
108	-15.1550	0.0000	8.7500	63	0.7081	4.4000	-9.1319
109	-8.7500	0.0000	15.1550	64	10.2580	4.4000	-1.1158
112	0.0000	0.0000	-17.5000	65	8.2513	4.4000	4.0060
113	0.0000	0.0000	17.5000	66	-0.9764	4.4000	9.3724
126	8.7500	0.0000	15.1550	67	-10.4080	4.4000	1.2869
128	17.5000	0.0000	0.0000	68	-4.5806	4.4000	-7.5628
129	15.1550	0.0000	8.7500	69	0.9802	4.4000	-4.2095
130	8.7500	0.0000	-15.1550	70	4.1465	4.4000	1.4108

Tabla 6.5 Coordenadas y números de los nodos de cada contacto

Como se puede apreciar en la Tabla 5.5, tanto en el keypoint 100000 como en el 200000, los valores de la coordenada Y son constantes con valores de 0.00000 y 0.44000 metros respectivamente. Esto se debe a que los pares de contacto están ubicados en los dos extremos del eje principal del cigüeñal, donde se tienen planos con una Y constante.

6.1.4 Análisis modal

El análisis modal en Ansys se realiza a partir del cigüeñal que ha sido mallado en esta misma plataforma. Para ambos análisis, tanto en Ansys como en Simpack, se van a obtener las 20 primeras vibraciones propias del volumen. Se siguen unos pasos que se van detallando hasta realizar el análisis.

Para empezar a realizar el estudio se necesita tener el archivo “Mallado.db” abierto en Ansys. Para definir un análisis modal se va a *Preprocessor > Loads > Analysis Type > New Analysis* y una vez ahí aparece una lista con los distintos análisis que se pueden ejecutar, se selecciona la opción de *Modal* (Figura 6.18). Después en el mismo sector, en *Analysis Options* se indica que se quieren obtener las 20 primeras frecuencias propias del cigüeñal. El programa da la opción de acotar el rango de búsqueda entre un máximo y un mínimo, pero se dejan ambas casillas a cero para que muestre las primeras 20 frecuencias.

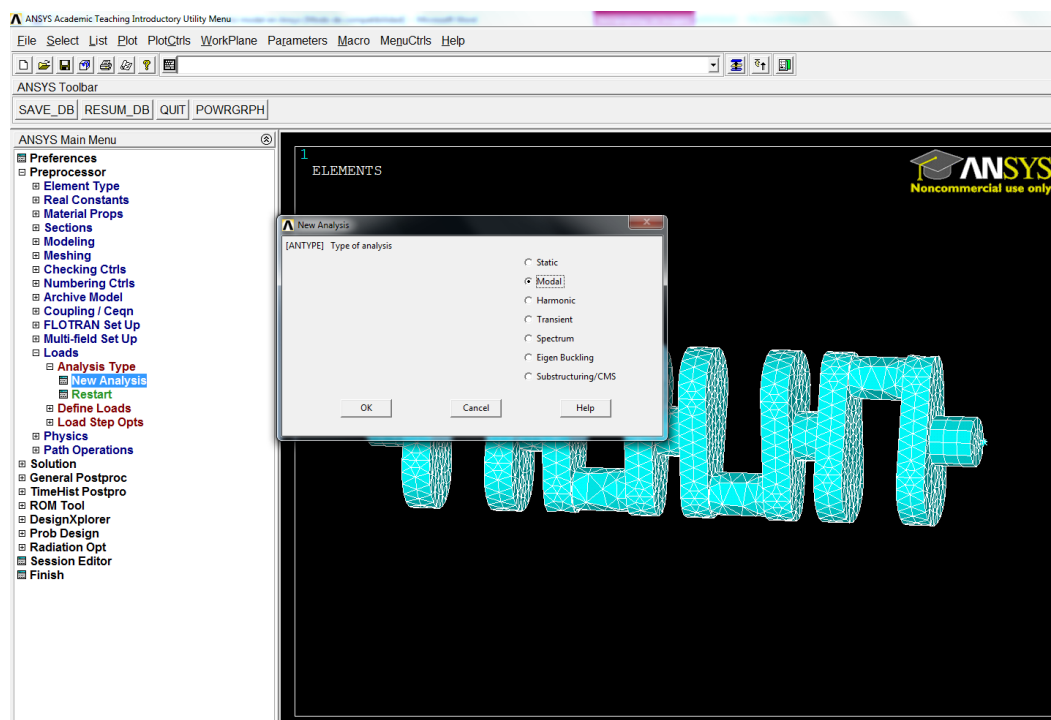


Figura 6.18 Selección de estudio de análisis modal (Ansys)

El siguiente paso es que el programa empiece a calcular los resultados. Para ello se tiene que ir a *Solution > Solve > Current LS* y se confirma el análisis. Una vez se tenga realizado se pueden ver los resultados obtenidos. Para ellos se va a *General Postproc > Results Summary* y se obtiene una lista con los valores de las 20 primeras frecuencias propias del cigüeñal como puede verse en la Figura 6.19.

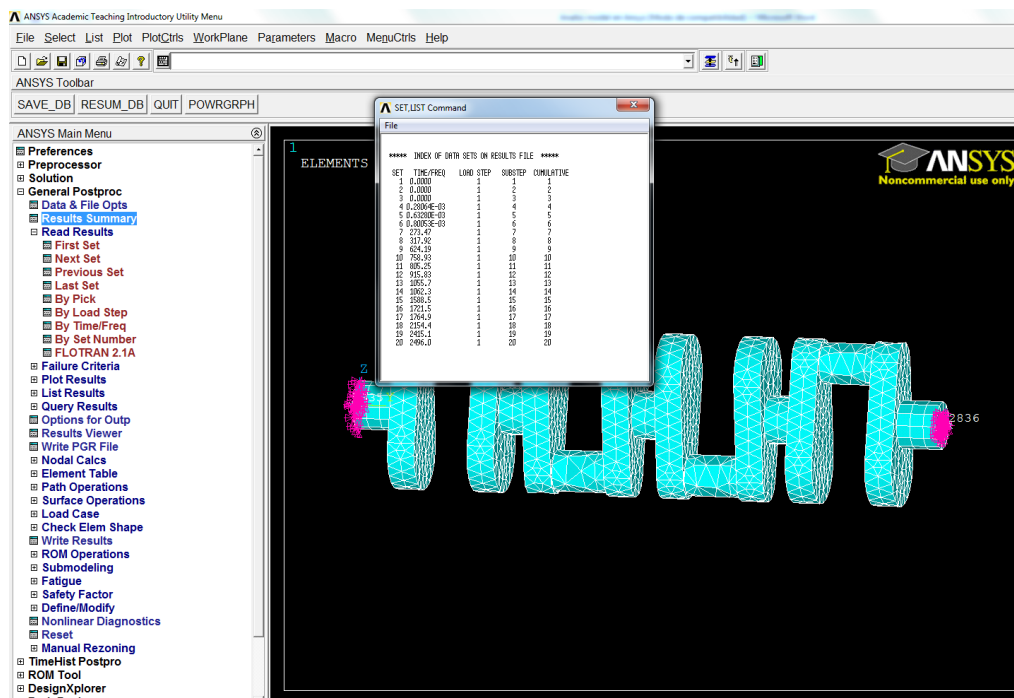


Figura 6.19 Lista de las 20 primeras frecuencias propias (Ansys)

6.2 Análisis modal en Simpack

6.2.1 Importación de la malla

Para realizar el análisis modal en Simpack, lo primero que se tiene que hacer es realizar una importación de la malla desde Ansys. Esto se debe a que no se tiene el módulo de mallado dentro del programa Simpack. Para solventar esto se puede importar la malla desde tres programas que son compatibles con Simpack. Estos programas son Abaqus, Nastran y Ansys.

La importación de la malla es algo complejo, ya que no es tan obvio como mallar una geometría guardarla y abrirla en otro software. El proceso ha resultado algo más laborioso y complicado de lo que se esperaba.

La guía de Simpack indica que para realizar una importación de una geometría mallada se necesitan diferentes archivos de los diferentes programas que son compatibles y que se han mencionado anteriormente. En la Figura 6.20 que proporciona la guía de Simpack [27], pueden verse los diferentes archivos necesarios con cada uno de los programas.

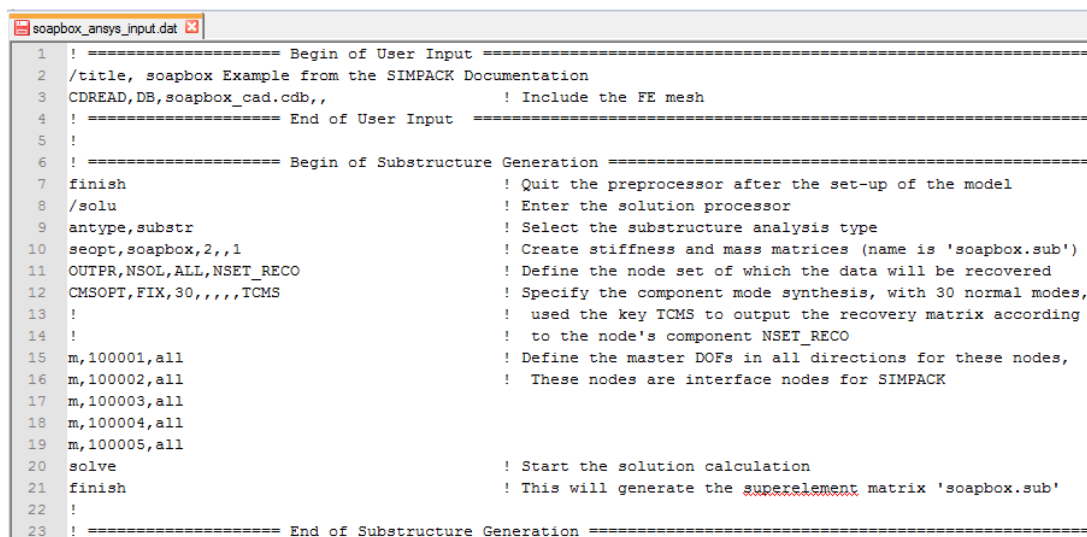
FE code	Input File
Abaqus FEA	(up to and including version 6.11) <modelname>.odb <modelname>.inp
	(version 6.13) <modelname>.simp_Z1.sim <modelname>.inp <modelname>.fil
ANSYS	<modelname>.sub <modelname>.tcms <modelname>.cdb
MSC Nastran, NX Nastran	<modelname>.op2 <modelname>_superelement.op2 <modelname>.bdf

Figura 6.20 Archivos necesarios para la importación de la malla

Dado que se va a utilizar Ansys, los archivos que se necesitan tienen las siguientes extensiones: “.sub”, “.tcms” y “.cdb”. Ha sido necesario investigar para poder obtener estos archivos. Uno de ellos, el archivo “.cdb” puede ser obtenido en Ansys de manera directa. Para ello hay que ir a *Pre-Processor > Archive Model > Write*.

Para obtener los dos archivos restantes, el “.sub” y el “.tcms”, se decide investigar un ejemplo de importación de malla de la guía de Simpack. El ejemplo puede ser descargado para que el usuario pueda realizarlo él mismo. Este ejemplo, llamado “tutorial_flex_I”, contiene diferentes carpetas con la información necesaria para llevar a cabo el proceso. El ejemplo se puede realizar con los tres programas compatibles (Abaqus, Ansys y Nastran), pero se estudia los archivos de la carpeta de Ansys.

En esta carpeta se encuentran dos archivos, “soapbox_ansys_input.dat” y “soapbox_cad.cdb”. Al abrirlos con el editor de texto NotePad++ (Figura 6.21) se descubre que contiene cada uno de los archivos. El archivo “soapbox_ansys_input.dat” contiene unas líneas de código con diferentes comandos. Tras estudiar el archivo se llega a la conclusión de que los comandos realizan operaciones dentro de Ansys. El código tiene comentarios donde se van explicando los diferentes procesos que se van llevando a cabo en cada comando. También al principio del archivo se puede ver como se comenta que se introducen comandos para que lean el archivo “.cdb”, y que este archivo contiene la malla de elementos finitos de la geometría. Todo ello nos lleva a la conclusión de que el archivo que se consigue obtener desde Ansys, el “.cdb” es el principal para obtener los otros dos archivos necesarios.



```
1 ! ===== Begin of User Input =====
2 /title, soapbox Example from the SIMPACK Documentation
3 CDREAD,DB,soapbox_cad.cdb,, ! Include the FE mesh
4 ! ===== End of User Input =====
5 !
6 ! ===== Begin of Substructure Generation =====
7 finish ! Quit the preprocessor after the set-up of the model
8 /solu ! Enter the solution processor
9 antype,substr ! Select the substructure analysis type
10 seopt,soapbox,2,,1 ! Create stiffness and mass matrices (name is 'soapbox.sub')
11 OUTPR,NSOL,ALL,NSET_RECO ! Define the node set of which the data will be recovered
12 CMSOPT, FIX, 30,,,,,TCMS ! Specify the component mode synthesis, with 30 normal modes,
13 ! ! used the key TCMS to output the recovery matrix according
14 ! ! to the node's component NSET_RECO
15 m,100001,all ! Define the master DOFs in all directions for these nodes,
16 m,100002,all ! These nodes are interface nodes for SIMPACK
17 m,100003,all
18 m,100004,all
19 m,100005,all
20 solve ! Start the solution calculation
21 finish ! This will generate the superelement matrix 'soapbox.sub'
22 !
23 ! ===== End of Substructure Generation =====
```

Figura 6.21 Código del archivo “soapbox_ansys_input.dat”

Al abrir el archivo “soapbox_cad.cdb” también con el editor de texto NotePad++, se puede observar como este archivo contiene el código con toda la información de la geometría, de la malla, de los elementos usados, etc. Por lo que al ser el mismo archivo que se consigue generar, se tiene toda la información de la geometría y la malla.

Al estudiar el ejemplo a partir de la guía de Simpack [27] se descubrió que para poder importar una malla a Simpack era necesario que la malla contuviera nodos maestros. Esto se resume a que en la malla debe haber pares de contacto, para poder realizar el contacto de elementos dentro de Simpack. Es por esta razón por la que al realizar el mallado del cigüeñal en Ansys se hacen los pares de contacto.

También del ejemplo se puede determinar que los nodos maestros para el contacto que utilizan son los que denomina como 100001, 100002, 100003, 100004 y 100005. Estos nodos se pueden ver en el archivo “soapbox_ansys_input.dat” de la Figura 6.21, por lo que se determina que al introducir los comandos en Ansys, los nodos maestros usados deben estar presentes.

Se realiza una prueba para determinar si abriendo primero el archivo “soapbox_cad.cdb” en Ansys y posteriormente introduciendo los comandos del archivo “soapbox_ansys_input.dat” se obtienen los archivos necesarios. Se puede comprobarse que si que se generan, por lo que ya se tiene una manera de proceder.

Para obtener los archivos lo primero que se hace es que teniendo el cigüeñal mallado en Ansys, se crea un archivo “.cdb” que contenga la información de la geometría y la malla. El archivo, cuyo nombre es “Mallado.cdb”, se guarda a parte. Lo segundo que se debe hacer es hacer los cambios oportunos en el archivo “soapbox_ansys_input.dat” para que sea compatible con el archivo “.cdb” creado. Estos cambios consisten en cambiar el nombre y el número de los nodos maestros. Pueden verse las modificaciones en la Figura 6.22. Una vez se tengan estos pasos hechos, se inicia Ansys APDL y se abre el archivo “Mallado.cdb”, se crea un directorio donde se quiere enviar los archivos y se introduce el código de la Figura 6.22 para poder generar los datos deseados. De esta manera se tienen los archivos con los que en Simpack se puede crear el archivo de la pieza mallada.

```
soapbox_ansys_input.dat
1  ! ===== Begin of User Input =====
2  /title, soapbox Example from the SIMPACK Documentation
3  CDREAD,DB,Mallado.cdb,, ! Include the FE mesh
4  ! ===== End of User Input =====
5  !
6  ! ===== Begin of Substructure Generation =====
7  finish ! Quit the preprocessor after the set-up of the model
8  /solu ! Enter the solution processor
9  antype,substr ! Select the substructure analysis type
10 seopt,Mallado,2,,1 ! Create stiffness and mass matrices (name is 'Mallado.sub')
11 OUTPR,NSOL,ALL,NSET_RECO ! Define the node set of which the data will be recovered
12 CMSOPT,FIX,30,,,,TCMS ! Specify the component mode synthesis, with 30 normal modes,
13 ! ! used the key TCMS to output the recovery matrix according
14 ! ! to the node's component NSET_RECO
15 m,2833,all ! Define the master DOFs in all directions for these nodes,
16 m,2834,all ! These nodes are interface nodes for SIMPACK
17
18 solve ! Start the solution calculation
19 finish ! This will generate the superelement matrix 'Mallado.sub'
20 !
21 ! ===== End of Substructure Generation =====
```

Figura 6.22 Código del mallado

Lo siguiente que hay que hacer es abrir Simpack para generar el archivo de mallado dentro de este programa, que tiene una extensión “.fbi”. Para ello se va a *Utilities > FBI Files > Generation*, se introducen los archivos de entrada que son el

“Mallado.cdb”, el “Mallado.tcms” y el “Mallado.sub”. De esta manera se genera el archivo “Mallado.fbi” que ya puede ser abierto en Simpack para tener el cigüeñal mallado y listo para ser analizado.

6.2.2 Análisis modal

El análisis modal que se hace en Simpack se realiza usando el módulo *FlexModal*. Para ello se crea un cuerpo nuevo y se cambia el que viene por defecto por cigüeñal mallado introduciendo el archivo “Mallado.fbi” en la parte *Flexible* de las opciones del cuerpo.

Antes de realizar el análisis se tiene que hacer un equilibrio estático del modelo, para ello simplemente se va a *Static Equilibrium* en la barra de herramientas de Simpack. El análisis modal se realiza yendo a las propiedades del cuerpo y una vez allí a *Modes*. Aquí se señala que se quieren obtener los 20 primeros modos de vibración seleccionando en *Eigenmode* la opción de *f-min, n-modes*. Automáticamente salen los 20 primeros modos de vibración de nuestro modelo. Las opciones añadidas así como la lista de los modos de vibración pueden verse en la Figura 6.23.

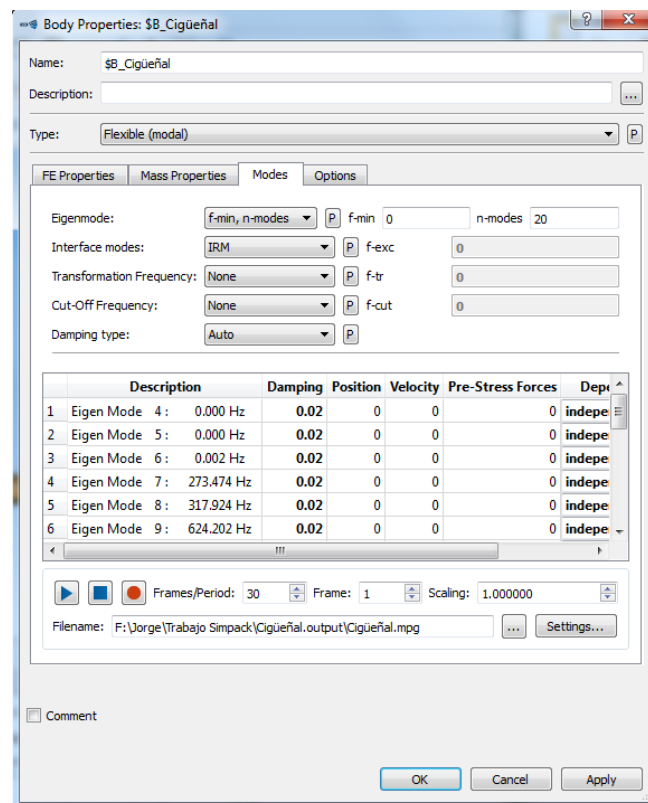


Figura 6.23 Opciones y lista de los modos de vibración

6.3 Resultados

Los resultados obtenidos en ambos análisis son prácticamente los mismos, por lo que se puede decir que el análisis no se ha visto afectado en la importación del archivo desde un programa a otro. En los dos análisis las primeras seis frecuencias son cero o muy próximas a cero. Esto se debe a que son los modos propios de un sólido rígido que no tienen energía, es decir, que al no haber condiciones de contorno tanto las traslaciones como las rotaciones están permitidas en los tres ejes x, y, z. En el caso por ejemplo de tener el cigüeñal empotrado en uno de sus extremos, solo tendría permitido tres movimientos, por lo que únicamente las tres primeras frecuencias propias serían cero. En la Tabla 6.6 puede verse la comparación de los valores obtenidos en Ansys y Simpack, así como sus valores expresados tanto en Hertzios como en revoluciones por minuto. Es importante en un cigüeñal expresar sus frecuencias propias en revoluciones por minuto ya que a los motores donde va implementado se les somete a diferentes regímenes de giro. En este caso al tratarse de un motor de tamaño mediano que podría ir instalado en un automóvil, los valores a los que estará sometido el cigüeñal son entre 900 y 6500 revoluciones por minuto.

Modos de vibración	Ansys		Simpack	
	Hertzios	RPM	Hertzios	RPM
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00
7	273.47	16408.2	273.47	16408.2
8	317.92	19075.2	317.92	19075.2
9	624.19	37451.4	624.20	37452
10	758.93	45535.8	758.99	45539.4
11	805.25	48315	805.65	48339
12	915.83	54949.8	915.86	54951.6
13	1055.70	63342	1056.73	63403.8
14	1062.30	63738	1062.34	63740.4
15	1588.50	95310	1588.64	95318.4
16	1721.50	103290	1721.57	103294.2
17	1764.90	105894	1765.04	105902.4
18	2154.40	129264	2154.51	129270.6
19	2415.10	144906	2415.32	144919.2
20	2496.00	149760	2496.94	149816.4

Tabla 6.6 Comparación de los valores obtenidos

Como puede observarse en la Tabla 6.6 la primera frecuencia distinta de cero en revoluciones por minuto está muy lejos del rango de actuación de un motor con las dimensiones expuestas en este proyecto. Se puede determinar por tanto que no habría riesgo de alcanzar estas frecuencias estando operativo el cigüeñal.

Tanto en Ansys como en Simpack se han obtenido la representación de los 20 modos de vibración. A continuación van a presentarse algunos de ellos.

- Séptimo modo de vibración.

Este séptimo modo es el primero en ser distinto de cero. Tiene un valor de 273.47 Hz y representa la flexión en torno al eje y . En la Figura 6.24 se muestra su representación en Ansys y en la Figura 6.25 en Simpack.

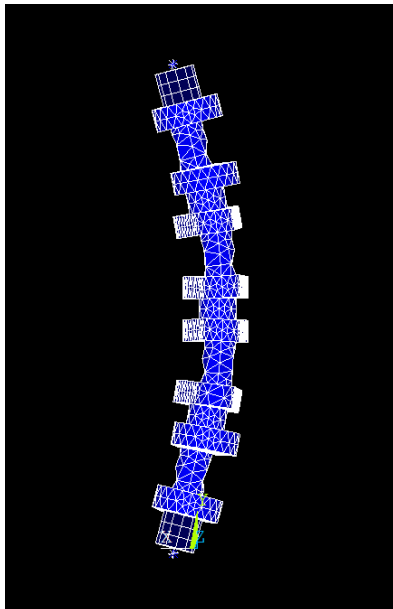


Figura 6.24 Séptimo modo de vibración
(Ansys)

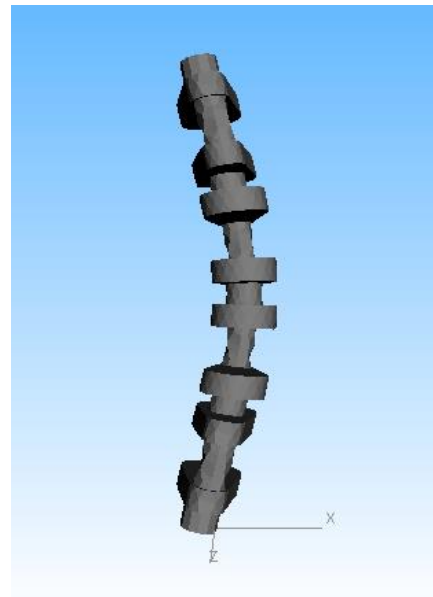


Figura 6.25 Séptimo modo de vibración
(Simpack)

- Noveno modo de vibración.

Este modo representa la torsión en torno al eje y . Tiene un valor de 624.20 Hz y puede verse en la Figura 6.27 con Ansys y en la Figura 6.26 con Simpack.

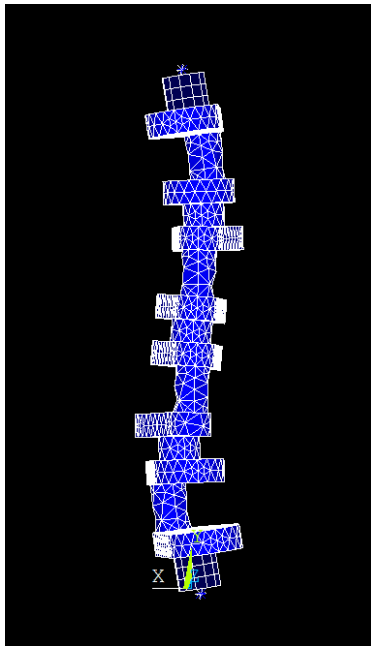


Figura 6.27 Noveno modo de vibración (Ansys)

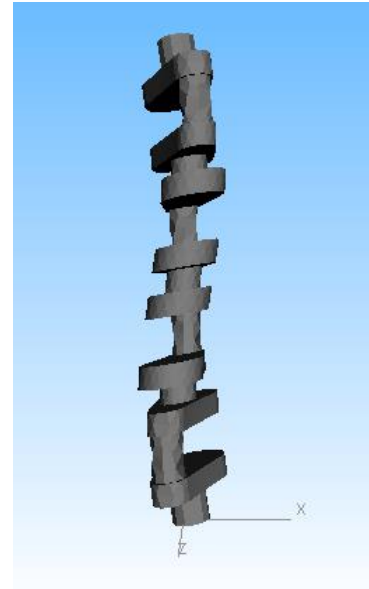


Figura 6.26 Noveno modo de vibración (Simpack)

- Decimocuarto modo de vibración.

Por último presentar el decimocuarto modo de vibración que tiene un valor de 1062.34 Hz y que representa una combinación de flexión y torsión entorno al eje y . En la Figura XX se puede ver en Ansys y en la Figura XX en Simpack donde se aprecia con mayor detalle la combinación de torsión y flexión.

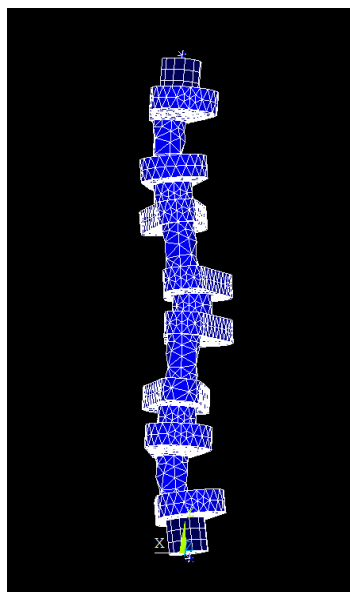


Figura 6.29 Decimocuarto modo de vibración (Ansys)

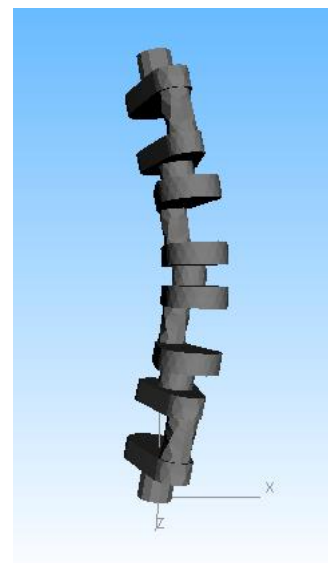


Figura 6.28 Decimocuarto modo de vibración (Simapck)

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

7.1 Conclusiones

En este Trabajo Fin de Grado se ha modelado un motor de cuatro cilindros en línea como un sistema multicuerpo con el programa Simpack. Para conseguirlo ha sido necesario definir tanto cada una de las geometrías de los cuerpos como las uniones entre ellos. Se ha realizado un análisis modal en este programa, importando la geometría del cigüeñal como cuerpo flexible desde Ansys. A su vez en este último programa se ha realizado otro análisis modal con la intención de comprobar si al hacer la importación los valores de frecuencias propias se ven afectados.

La modelización del motor en Simpack se ha llevado a cabo de manera satisfactoria, consiguiendo entender el proceso para crear y conectar cuerpos hasta definir un sistema multicuerpo.

El mayor inconveniente ha radicado en conseguir averiguar el modo corrector de realizar la importación del cuerpo flexible, ya que no se trataba de hacer simplemente un mallado convencional. Conseguir los archivos necesarios para esta importación también ha sido un paso complejo en el que ha sido necesario un proceso de investigación.

Los datos obtenidos en ambos análisis modales son los mismos, por lo que se puede determinar que el proceso de importación no ha afectado a los valores del análisis. Las frecuencias propias del cigüeñal no entran ninguna dentro del rango de actuación que tiene este elemento dentro de un motor como el que se ha modelado. Se puede determinar por tanto que no habrá problemas en su funcionamiento dentro del motor.

7.2 Futuros desarrollos

Como futuros desarrollos se pueden realizar una serie de futuras líneas de trabajo. Una de ellas sería obtener el cuerpo flexible a partir de los otros dos software con los que se puede hacer la importación. Estos son Abaqus y Nastran. De esta manera podría verse otras alternativas que pudieran resultar más sencillas para importar cuerpos flexibles a Simpack.

Otro desarrollo futuro de interés sería implementar el cuerpo flexible del cigüeñal dentro del sistema multicuerpo. En el caso de seguir sin tener el módulo de mallado en Simpack, el proceso sería el mismo que se ha realizado en este proyecto, pero añadiendo en el mallado en Ansys un par de contacto en cada muñequilla del cigüeñal para hacer en Simpack el contacto de cada una de las bielas del motor. En el caso de poder realizar el mallado en Simpack podría estudiarse realizar el motor completo mediante cuerpos flexibles y así estudiar tensiones y deformaciones al someterle a las frecuencias de trabajo habituales en un motor.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Historia de los motores de combustión interna*. **Gavira Ríos, Jorge Enrique, Hernan Mora Guzmán, Jorge y Ramiro Agudelo, John**. 2002.
- [2] **Desantes Fernández, Jose María y Payri González, Francisco**. *Motores de combustión interna alternativos*. s.l. : Editorial Reverte, 2011.
- [3] Taringa. [En línea] <http://ingenieria.udea.edu.co/investigacion/grupogas/docs/Historia%20de%20los%20motores%20de%20combustin%20interna.pdf>.
- [4] Surgarden. [En línea] <http://www.surgarden.es/blog/funcionamiento-de-un-motor-de-2-tiempos/>.
- [5] **Pérez Herrero, R**. *Introducción al conocimiento práctico de los motores alternativos*. Septiembre 1993.
- [6] Aficionados a la Mecánica. [En línea] <http://www.aficionadosalamecanica.net/motor-estructura.htm>.
- [7] MOTORSERVICE. [En línea] <http://www.ms-motorservice.com/es/productos-y-catalogos/ks-trw-productos/producto-detalles/prod/pistones/>.
- [8] Saenz. [En línea] <http://www.saenzgroup.net/bielas.html>.
- [9] km77.com. [En línea] <http://www.km77.com/glosario/c/ciguenal.asp>.
- [11] BMW-Motorrad. [En línea] http://www.bmw-motorrad.at/at/de/index.html?content=http://www.bmw-motorrad.at/at/de/technology_detail/engine_drive/item_two_cylinder_flat_twin_engine.html¬rack=1.
- [12] [En línea] <http://www.rcmadrid.com/motor-radial-160cc-cilindros-gasolina-p-76943.html?osCsid=ca6cf641832ab76398ad5dd6c08fe4bf>.
- [13] noticias.coches.com. [En línea] <http://noticias.coches.com/noticias-motor/hasta-luego-motor-rotativo-wankel/53462>.
- [14] **Sánchez González, Alejandro**. Desarrollo de una librería multicuerpo con EcosimPro. Leganés : s.n., 2011. UC3M

- [15] **Fortes Garrido, Juan Carlos.** Modelado computacional para el análisis dinámico, mediante método matricial, de sistemas multicuerpo de seis elementos. Huelva : Universidad de Huelva, 2009.
- [16] MateWiki. [En línea] https://mat.caminos.upm.es/wiki/Sistemas_resorte-masa.
- [17] Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras. [En línea] http://www.imem.unavarra.es/jzurita/pages/03_master.link/00_control.link/101_L01.link/101_Cap01_104.dat.html.
- [18] Análisis Dinámico de Sistemas Multicuerpo. Madrid : UPM.
- [19] Contactos entre sólidos. Sevilla : Universidad de Sevilla.
- [20] MIT OPEN COURSEWARE. [En línea] <http://mit.ocw.universia.net/2.003/s02/labs/al3-index.htm>.
- [21] Simpack. [En línea] <http://www.simpack.com/>.
- [22] Ansys. [En línea] http://www.ansys.com/es_es.
- [23] Dessault systemes Simulia - Abaqus Unified FEA. [En línea] <http://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>.
- [24] NX NASTRAN. [En línea] <http://www.iberisa.com/productos/nxnastran.htm>.
- [25] **Barahona Rivera, Luis Miguel y Llivisava Muñoz, Diego Esteban.** Análisis estático de frecuencias naturales del cigüeñal y volante de inercia del vehículo Hyundai Accent. Cuenca : Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [26] **Meng, Jian, Liu, Yongqi y Liu, Ruixiang.** Finite Element Analysis of 4-Cylinder Diesel Crankshaft. Shandong : School of Traffic and Vehicle Engineering Shandong.
- [27] *Simpack Documentation.*
- [28] Javelin. [En línea] <http://www.javelin-tech.com/blog/2013/04/solidworks-import-solution-wrong-units-in-iges-files/>.
- [29] Ansys Chapter 4. [En línea] http://www.ansys.stuba.sk/html/elem_55/chapter4/.